



HAL
open science

**Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la
génération automatique de gamme d'usinage :
Application aux pièces aéronautiques de structure,
prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL
USIQUICK**

Ramy Harik

► **To cite this version:**

Ramy Harik. Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK. Mécanique [physics.med-ph]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2007. Français. NNT : . tel-00173161

HAL Id: tel-00173161

<https://theses.hal.science/tel-00173161>

Submitted on 19 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I
en Automatique, Traitement du Signal, Génie Informatique

par **Ramy Farid HARIK**

**Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de
gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel
dans le cadre du projet RNTL USIQUICK**

Soutenance publique le 27 Juin 2007

Membres du jury :

Président :	M. Alain BERNARD	Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Rapporteurs :	M. Bernard ANSELMETTI	Professeur, Université Paris Sud 11
	M. Dominique DENEUX	Professeur, Université de Valenciennes
Examineurs :	M. Thierry DIVOUX	Professeur, UHP Nancy I (Directeur de thématique)
	M. Roland MARANZANA	Professeur, ETS Montréal
	M. Patrick MERLAT	Directeur R&D DELMIA, Dassault Systèmes
	M. Gabriel RIS	Professeur, UHP Nancy I (Directeur de thèse)
	M. Christian ROUCHON	Chef de projet USIQUICK, Dassault Aviation
Invités :	M. Jean DUNAT	Ministère de l'économie, des Finances et de l'industrie
	M. Bernard GOEMAERE	Expert Préparateur, Dassault Aviation
	M. Jean-Marc GRILLET	DG Opérations Industrielles, Dassault Aviation

*A mes parents,
A Samar.*

Les dernières années ont apporté plein de changements. L'homme que je suis devenu sera a jamais marqué par cette expérience. Nous sommes ce que nous partageons, ce que nous donnons et ce que nous recevons. Je voudrais à travers ces quelques lignes exprimer ma reconnaissance envers ceux qui ont toujours été à mes cotés, d'une façon ou d'une autre, et m'ont encouragé à suivre ma voie,

L'essentiel de ma thèse a été inspiré et guidé par le consortium USIQUICK. Je porte une grande estime à Mr. Patrick MERLAT, Mr. Christian ROUCHON, M. Bernard GOEMAERE et – surtout - Mr Jean Marc GRILLET qui ont marqué mon travail de leur touche industrielle. Je leur remercie pour l'encouragement tout au long du projet et de leur participation à mon jury de thèse.

Je m'adresse également aux autres associés avec beaucoup de respect, notamment M. Alain BERNARD sans lequel USIQUICK n'existerait pas aujourd'hui. Je remercie M. BERNARD particulièrement pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je remercie chaleureusement Messieurs Bernard ANSELMETTI et Dominique DENEUX pour avoir rapporté mon travail et en particulier pour leurs remarques constructives concernant le manuscrit. Je remercie également Messieurs Roland MARANZANA et Thierry DIVOUX pour leur participation au jury de thèse.

Je remercie M. Jean DUNAT, représentant du Ministère de l'économie, des Finances et de l'industrie pour m'avoir honorer par sa présence dans mon jury de thèse.

Je remercie également M. Francis LEPAGE, ancien directeur du CRAN et directeur de l'école doctorale IEAM, M. Alain Richard, directeur du CRAN, M. Jean-Yves BRON, directeur de l'AIPL, M. Michel VERON, ex-président du CIRP, pour leur soutien tout au long de ma thèse et de leur présence le jour de ma soutenance.

Je voudrais mentionner spécialement – parmi les gens ayant participé au projet USIQUICK – Alexandre (pour des moments vraiment inoubliables) et Samar de l'IRCCyN, Vincent, Yannick et Omar du L3S, Xavier (surtout pour les traductions du sens libanais) de Dassault Systèmes.

Remerciements

Mon laboratoire le **CRAN** et toutes les personnes qu'il représente (Belynda, Dominique, Fabien, Khaled...), le personnel de l'**AIPL** (Bibi, Cathy, Julien, Olivier ...) et les membres de **NumCOP²** (Zied, Lilia, Luc) sans oublier Delphine, le soldat inconnu. Mention spéciale à Muriel, la femme qui a tout, merci pour cette chance.

Mon '**Circle 0**' : Brig, Christelle F., Ghadi, Jimmy, Krystel I., Micheline, Mima, Nada, Peet et Suzy, merci puisque je suis votre miroir.

Ma famille française, la famille **Hammerer**. Damien, Laetitia, Laurie, Wendy, Scotty et bien évidemment mes femmes Annette et Monique. Merci pour ces week-ends et journées bourrées d'excellent moments.

Le Nounours Team: Big Baba Willy (William), Ben Harper (Alexandre) et Mimie Chaps (Emilie). Vous êtes les personnes avec qui j'ai partagé ces années. Merci pour tout, surtout au grand William.

Et puisque les meilleurs sont pour la fin...

Gaby, merci pour avoir été plus que mon directeur de thèse, comme un père pour moi en France.

Rony, l'homme avec qui j'ai partagé ce chapitre de ma vie. Merci d'avoir été tout ce que j'ai toujours voulu connaître.

Ma famille, Jamil, Rana, Jad, Caroline, Massoud, Layale, Freddy, Tracy, Kevin, Georges-Elie, Ramy-Joe et Asma-Eléna. Merci d'être la meilleure famille au monde.

Samar, pour avoir été l'ange parfait. Nous allons finalement commencer à vieillir ensemble.

Ma mère & mon père, vous êtes les meilleures parents qu'un être humain peut avoir dans sa vie. J'espère élever mes enfants comme vous avez élevé les vôtres. Merci d'avoir été toujours si fier de moi.

*Life is a flower
So precious in your hand,
Carry on smiling
And the world will smile with you...*

Sommaire

Introduction _____ **1**

Chapitre 1

Synthèse bibliographique _____ **9**

A. La génération automatique de gammes d'usinages _____ 12

B. Les entités d'usinage _____ 19

B. Etude de l'analyse de fabricabilité _____ 29

C. L'usinage en flanc _____ 34

D. Les approches d'accessibilité et de visibilité _____ 40

Chapitre 2

Le Transformateur : Aide à la prise en main de la pièce par l'opérateur pour la définition de la gamme d'usinage. ____ **45**

A. Caractérisation Géométrique _____ 51

B. Enrichissement Technologique Elémentaire _____ 61

C. Graphes d'enchaînements _____ 94

D. Interface Préparateur/Usiquick [HAR 06c] _____ 115

Chapitre 3

Le Transformateur : Mise en œuvre. _____ **127**

A. Architecture CAA du Logiciel _____ 129

B. Le Prototype _____ 133

C. Confrontation Industrielle _____ 140

Conclusion _____ **147**

Bibliographie _____ **155**

Annexes _____ **163**

Introduction

Le développement de l'Usine Numérique fait partie des grands bouleversements incontournables que l'industrie devra maîtriser pour maintenir et amplifier sa compétitivité. Sous ce concept d'usine numérique se trouve notamment un ensemble de méthodologies et d'outils mis à disposition des ingénieurs pour : concevoir les usines avec leurs systèmes de production, définir, optimiser et simuler leur fonctionnement. L'objectif est d'améliorer le triplet : coût, cycles et qualité, en particulier pour les produits de haute technologie, tout en assurant la rentabilité, gage de pérennité.

La création d'un référentiel unique structurant progressivement l'information associée à la définition du produit et à son processus d'obtention est un passage obligé à la maîtrise de l'usine numérique. La continuité 'produit virtuel' - 'processus virtuel' obtenue par la mise en œuvre effective de process industriels basés sur le PLM (Product Lifecycle Management) permet par simulation numérique d'assurer la faisabilité de l'industrialisation [HAR 05b], sans nécessiter de mise en œuvre de prototypes matériels coûteux et long à réaliser.

Aujourd'hui les cycles d'industrialisation des pièces pour de nombreuses filières (tôleries, tuyauteries, revêtement...) sont courts. Par contre, l'industrialisation des pièces mécaniques de complexité moyenne à forte est une tâche lourde qui consomme un temps conséquent et requiert une expertise élevée. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine aéronautique. La grande diversité de formes ne permet pas une automatisation totale de la fabrication. Les outils CFAO actuels viennent compléter efficacement le travail de l'opérateur, mais ne peuvent en aucun cas se substituer à lui. Malheureusement la non prise en compte de particularités difficilement visibles aboutit souvent à la réalisation de pièces non conformes qui doivent être reprises. La mise en évidence par logiciel de ces particularités doit diminuer considérablement les erreurs et par conséquent réduire le temps nécessaire à leur traitement. Le temps consommé induit un impact direct sur le coût de la production et la mise sur le marché.

Dans ce domaine de la fabrication, le Réseau National des Technologies Logicielles (RNTL) a soutenu le projet USIQUICK pour répondre aux besoins de l'industrie aéronautique. USIQUICK se limite à l'étude du cycle de vie du produit au niveau réalisation. Cette frontière de l'étude comprend donc les métiers de la conception, de la génération de gamme d'usinage et de la fabrication. Le concepteur traduit le cahier des charges, établi à partir des besoins à satisfaire, en une modélisation du bien à réaliser. Le gammiste met en place les différentes phases d'usinage pour la réalisation de la pièce à partir d'un brut préalablement défini. Enfin, le fabricant génère les trajectoires outil en prenant en compte les données techniques de la machine, du matériau et du catalogue outil. Auparavant, la conception occupait une place prioritaire et toute liberté était laissée au concepteur. Définir des pièces facilement réalisables n'était pas pour lui une priorité. Actuellement, les ingénieries concourantes et collaboratives ont modifié cet état de fait et ont mis sur un même pied d'égalité les différents métiers. Il faut concevoir tout en s'assurant que la pièce est réalisable à un coût minimal ou tout au moins raisonnable.

Etablir convenablement l'ensemble des informations nécessaires à la fabrication d'une pièce mécanique de complexité moyenne à forte (gammes, trajectoires d'outils, outillages...) prend beaucoup de temps (jusqu'à 20 jours pour des pièces non produites en masse). Notre but est de réduire ce temps du cycle d'industrialisation des produits en spécifiant des fonctionnalités d'assistance à cette partie charnière. D'autre part ces fonctionnalités devraient permettre une certaine transmission des méthodes et connaissances des préparateurs chevronnés aux préparateurs débutants.

I. La partie charnière : la génération assistée de gammes de fabrication

Pour aider les métiers de la conception et de la fabrication de produits manufacturés, de nombreux logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) ont été développés et commercialisés au cours de ces 50 dernières années.

Le premier logiciel de CAO, labellisé DAO (Dessin Assisté par Ordinateur), est apparu en 1963 (Sketchpad développé par Ivan Sutherland à MIT). Dans les années 1970 est apparue la modélisation solide 3D mettant en œuvre 2 techniques différentes : B-Rep (Boundary Representation) et CSG (Constructive Solid Geometry). Plus tard, la modélisation s'appuyant sur les NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) a permis d'harmoniser la représentation de toutes les courbes et surfaces utilisées en CAO.

Le premier logiciel de FAO commercialisé PRONTO fut développé par Patrick Hanratty en 1957. Comme les logiciels de CAO, la FAO a également énormément évolué grâce à l'augmentation de la puissance de calcul, de mémorisation et de visualisation des ordinateurs.

Cependant les systèmes de CAO et de FAO ont longtemps évolué en parallèle, sans véritable concertation, posant ainsi des problèmes pour passer de l'un à l'autre. De plus, peu de travaux ont été effectués au niveau de la génération de gamme, métier charnière entre la conception et la fabrication. Nous utilisons dans la suite la notation CAPP (Computer Aided Process Planning) pour désigner les systèmes de génération de gamme d'usinage assisté par ordinateur.



Figure 1. Emplacement de la partie charnière dans le cycle de vie du produit

Un vide sémantique subsiste entre CAO et CAPP provenant essentiellement de la différence des données numériques manipulées issues du produit. [DEN 92] note aussi le besoin d'enrichir le modèle géométrique d'une pièce par des attributs technologiques utiles à la génération de la gamme. De plus, les fonctionnalités CAPP des logiciels actuels présentent toujours peu d'aide effective à la génération des gammes d'usinage (ou de fabrication).

Le besoin peut alors se résumer en deux axes principaux :

- Comblent le vide sémantique entre les logiciels de CAO et de FAO pour un meilleur transfert des données.
- Mettre en place de nouvelles fonctionnalités CAPP pour assister la génération de gamme d'usinage.

Ces deux besoins constituent le tout premier module du processus USIQUICK : le Transformateur.

II. Le Transformateur USIQUICK

Le projet RNTL USIQUICK regroupe cinq laboratoires de recherches appartenant au groupe GAMA (CRAN – Nancy, 3S – Grenoble, IRCCyN – Nantes, LURPA – Paris, LGIPM – Metz), deux partenaires industriels (Dassault Aviation et Dassault Systèmes) et un centre d'expertise (CETIM).

Le processus USIQUICK se décompose en trois modules (Figure 2) : Transformateur, Préparation et Génération (voire annexe A pour plus de détails sur le projet et sur le découpage des différents modules).



Figure 2. La chaîne du processus USIQUICK

Le Transformateur est un module complètement automatique chargé de rendre le modèle géométrique issu de la CAO exploitable par les 2 autres modules ; notamment de précalculer l'usinabilité de la pièce ainsi que les difficultés prévisibles avant tout choix de moyens d'usinage. Il a pour entrées :

- les modèles (Produits - Géométriques - ...),
- le matériau,
- les moyens industriels (si ceux-ci sont déjà décidés),

Le Transformateur doit spécifiquement :

- traduire et enrichir le modèle géométrique provenant du logiciel de CAO en un modèle compréhensible par les logiciels de CAPP/FAO. L'enrichissement se fait en portant des attributs géométriques précalculés sur les nouveaux objets constituant le nouveau modèle, dit modèle USIQUICK.
- mettre en place des fonctions d'aide à la génération de la gamme d'usinage : typage selon les modes d'usinage potentiels des faces, identification des entités d'usinage spécifiques (haut d'ailes et fonds minces), calculs des zones non usinables selon les différents modes d'usinage possibles (usinage en bout, usinage en flanc), extraction des directions d'usinage, calcul de la boîte englobante ainsi que de la première proposition de posage

Le Transformateur permet ainsi de raccourcir le temps de prise en main des pièces par le préparateur en lui fournissant un ensemble d'informations pour l'aider à déterminer rapidement la meilleure stratégie d'usinage. Il s'inscrit dans une démarche d'industrialisation de la fabrication. L'objectif final est de passer automatiquement ou tout au moins avec le minimum d'intervention de l'opérateur, de la pièce CAO à ses informations de fabrication : posage, programme CN, outillage, documentations...

III. Contribution des travaux de thèse

Notre contribution se trouve dans l'étude du Transformateur qui est le module de transformation du modèle CAO de la géométrie pièce en un modèle FAO comportant des informations géométriques, mais également non géométriques adaptées à la fabrication. Ce Transformateur doit fournir les informations nécessaires aux 2 modules avals d'USIQUICK : le module Préparation et le module Calcul de Trajectoire (dit Génération).

Les fonctions générales pour l'obtention du modèle FAO afin de lui adjoindre les informations nécessaires aux étapes de Préparation et de Calcul de trajectoire sont définies. L'enchaînement des étapes permettant le calcul de ces fonctions est déterminé.

Le transformateur comporte une 1ère étape de caractérisation de la géométrie afin notamment :

- de déterminer les faces planes et réglées qui ne s'usinent pas de la même manière que les autres faces,
- de distinguer les congés ou fillets qui sont des entités de raccordement entre faces « fonctionnelles » et qui seront usinés simultanément avec ces dernières,
- de distinguer les éléments étroits qui constituent des hauts d'ailes ou des frontières de fonds minces,
- de caractériser les arêtes dont la forme (droite, circulaire, quelconque) et la jonction à leurs faces adjacentes influencent directement le mode d'usinage.

Lors de la deuxième étape, l'exploitation de ces informations permet pour chaque face du modèle géométrique enrichi de typer les faces, c'est à dire tenter de lui associer au moins un processus d'usinage de finition, validé et indépendant des autres processus : UEB (usinable en bout), UEF (usinable en flanc), UQ (autre). Ce typage est complété par le calcul des directions d'usinage nécessaires et des masques qui excluent des faces UEB et UEF les zones non accessibles à l'outil. Les directions d'usinage calculées peuvent entraîner un usinage imparfait des voisinages de congés, les epsi-masques permettent de caractériser qualitativement les arêtes affectées. Ce typage aboutit à l'obtention des entités d'usinage élémentaire.

La troisième étape analyse le graphe de la géométrie enrichie et détermine les faces pouvant être enchaînées simultanément. On regroupe les différentes entités d'usinage élémentaires en des entités d'usinage de niveau sémantique supérieur. Ce regroupement se fait par une analyse de graphe d'adjacence des faces. Nous portons aussi une attention particulière sur des entités d'usinage « singulières » : les fonds minces et les hauts d'ailes.

Une quatrième partie replace les algorithmes précédents dans le contexte du préparateur. On y met en évidence les fonctions « utilisateur » du transformateur et leur enchaînement logique, tout en identifiant les éléments du modèle enrichi qu'elle mobilisent.

Ces étapes Transformateur sont implémentées dans un Démonstrateur dont la validité est présentée sur quelques exemples. Il a été testé sur 15 pièces réelles avec des temps de traitement tout à fait raisonnables. Le Démonstrateur a été présenté le 12 décembre 2006 durant la journée de clôture du projet RNTL.

IV. Organisation du mémoire

Au travers de notre introduction, nous avons mis en avant le vide sémantique entre les métiers du concepteur et du préparateur. Ce vide sémantique constitue le point de départ de notre problématique et est traité par le module Transformateur du projet RNTL USIQUICK.

Le chapitre 1 de ce mémoire nous permet de situer les différents travaux existant dans différents domaines intéressants pour notre recherche. De ce fait, nous abordons les méthodes de génération automatique de gamme d'usinage, la reconnaissance d'entités d'usinage, l'analyse de fabricabilité des pièces mécaniques, l'usinage en flanc et les algorithmes de calculs d'accessibilité et de visibilité.

Le chapitre 2 est scindé en quatre parties. Les trois premières concernent la définition des fonctions générales nécessaires à l'enrichissement du modèle CAO. La dernière porte sur la mise en place d'une interface IHM en fonction de l'usage des résultats par le préparateur. L'idée est de s'appuyer sur la démarche de résolution habituelle du préparateur, de la formaliser et de la reproduire en fonctions logicielles correspondant aux questions que se pose un opérateur en présence d'une pièce mécanique.

Nous validons dans le chapitre 3 les spécifications et fonctions proposées par la mise en œuvre d'un prototype logiciel développé en CAA® permettant l'implémentation du module de transformation sous CATIAV5®. L'architecture de l'application et les résultats obtenus sont également présentés.

Enfin, une conclusion synthétise les objectifs atteints. Nous dégageons au final quelques perspectives ouvertes par cette étude, tant sur le plan de l'extension des fonctions d'aide, que sur le plan, plus général, de l'approfondissement de ces fonctions.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

- A. La génération automatique de gammes d'usinages
- B. Les entités d'usinage
- C. Etude de l'analyse de fabricabilité
- D. L'usinage en flanc
- E. Les approches d'accessibilité et de visibilité

Introduction

L'objet de ce chapitre est de situer nos travaux par rapport aux travaux antérieurs dans les 5 domaines liés à cette thèse : la génération automatique de gammes d'usinage, la formalisation des connaissances dans les systèmes de génération de gammes d'usinage par l'intermédiaire des entités d'usinage, les principales méthodes d'analyse de fabricabilité, l'usinage en flanc et les différentes méthodes de calculs d'accessibilité.

Pour chacun de ces 5 domaines les « solutions bibliographiques » trouvées sont confrontées à notre problématique de génération de gammes d'usinage pour des pièces structurelles dans le cadre d'un logiciel d'industrialisation de ces dernières. Nous faisons ressortir les conclusions au fur et à mesure de l'étude détaillée de chacun de ces domaines.

Pour le premier domaine, nous effectuons un bref rappel de la définition d'une gamme d'usinage et des différentes approches en génération de gammes d'usinage. Nous présentons plusieurs systèmes dont certains ont été commercialisés, et recensons les lacunes des systèmes actuels. La conclusion de cette partie est qu'il est certainement trop ambitieux de chercher à automatiser complètement les systèmes CAPP et qu'il est plus raisonnable d'adjoindre aux systèmes actuels des fonctionnalités importantes d'aide à la génération de gammes.

La formalisation des connaissances dans les systèmes CAPP à l'aide d'entités d'usinage est ensuite abordée. Nous rappelons les bases de la modélisation par entité, la définition d'une entité d'usinage et les techniques de création ou de reconnaissance des entités d'usinage. Nous concluons par le besoin de disposer d'un modèle produit orienté FAO support du passage de la CAO vers la gamme.

Notre étude se poursuit par l'analyse de fabricabilité des pièces mécaniques. Nous faisons ressortir les différentes méthodes d'analyse de fabricabilité en général, et celles du domaine aéronautique en particulier. Il ressort qu'aucun des systèmes étudiés n'est réellement adaptable aux pièces aéronautiques de structure 5 axes. Ces pièces étant fabriquées essentiellement par usinage en bout et usinage en flanc, il faut disposer d'un système qui soit capable de déterminer quelles sont les faces d'une pièce qui sont usinables suivant ces modes beaucoup plus économiques que l'usinage par balayage.

Dans le domaine de l'usinage en flanc, des différentes études et algorithmes que nous avons analysés, il ressort que l'usinage en flanc de faces planes n'est quasiment jamais abordé. Ce type de face pose problème que ce soit pour définir les directions d'usinages les plus appropriées ou pour déterminer les zones non accessibles dues à des obstacles.

Ce dernier aspect : prise en compte du voisinage d'une face est finalement abordé au travers de la notion de visibilité. Nous décrivons les différentes techniques de calcul de la visibilité d'une face. Elles sont nombreuses et variées. De ces techniques nous prenons en compte deux, l'une d'entre elles est appliquée ultérieurement. Nous présentons aussi les sphères d'accessibilité qui sert pour la représentation des directions d'usinage et de leur accessibilité.

A. La génération automatique de gammes d'usinages

1. Définition d'une gamme d'usinage

Ce terme très général regroupe l'ensemble des informations, plus au moins détaillées, relatives à la réalisation d'une pièce [GAM 90]. La conception d'une gamme d'usinage est une opération qui consiste à proposer une suite d'étapes nécessaires pour passer de la pièce brute à la pièce finie. Cette opération doit tenir compte de plusieurs paramètres tels que : la définition de la pièce à obtenir, la technique d'obtention de la pièce brute, le contexte de production, les moyens de production... Une gamme qui se limite à la définition des grandes étapes de fabrication est appelée macro-gamme (Figure 3).

débit_matière
 ident_matière
 fraisage_cn_5axes_mcm_surfaçage
 fraisage_cn_5axes_mcm_réhausse
 fraisage_cn_5axes_mcm_réhausse
 fraisage_cn_5axes_mcm_réhausse
 marquage_frappe
 tribofinition
 ragréage
 contrôle_dimensionnel
 contrôle_ressuage
 compression_surface_GPVH_manuel
 contrôle_traitement_de_surface_après_GPVH
 oxydation_anodique_chromique_BF5
 contrôle_traitement_de_surface_après_oxydation
 peinture_pèce_élémentaire
 contrôle_peinture
 contrôle_final_et_visa_qualité
 rentrée_dépôt

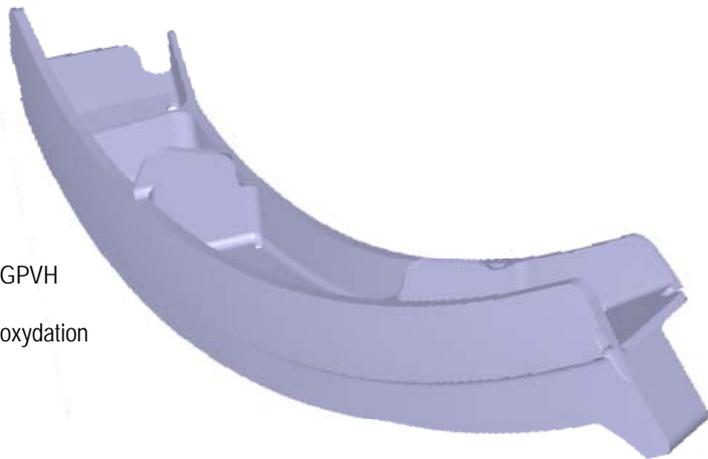


Figure 3. Exemple de macro-gamme (source : Dassault Aviation)

Préparer la gamme d'usinage d'une pièce complexe nécessite une expertise métier conséquente et une connaissance complète des ressources de l'entreprise. Pour élaborer une gamme d'usinage, il n'existe pas de démarche structurée, pas de technique éprouvée, pas d'ouvrages de synthèse, pas de normes. Tout repose sur l'expérience de l'opérateur et de sa connaissance des méthodes de fabrication (Figure 4) [ANS 94]. Le 'gammiste' doit concevoir une gamme afin que le temps de production soit le plus optimal et le plus économique possible tout en respectant la qualité exigée.

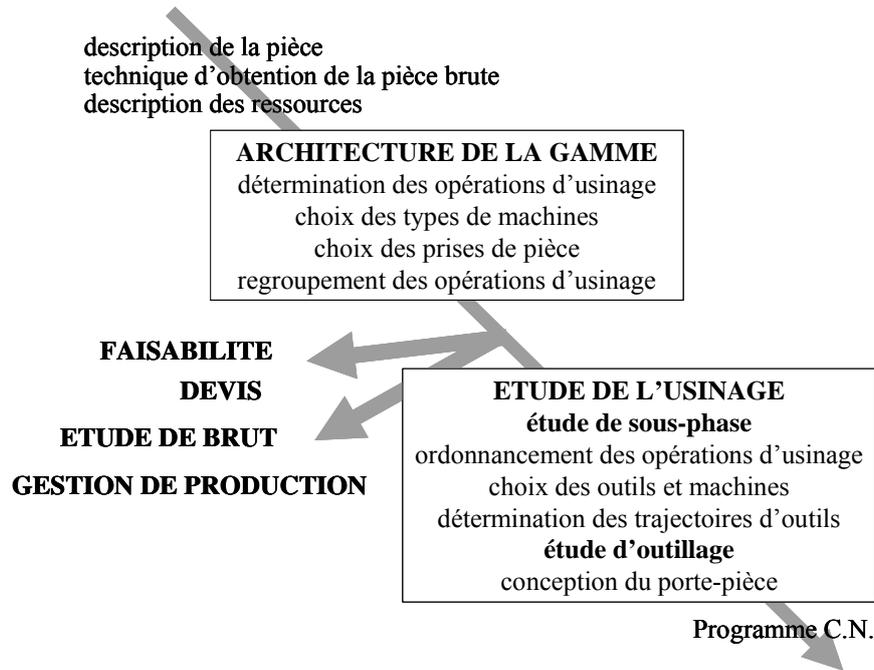


Figure 4. Conception de gammes d'usinage [BRI C]

En dépit des difficultés d'élaboration manuelle des gammes d'usinage, quelques chercheurs se sont intéressés à leur génération automatique. Pouvoir générer une gamme automatiquement est particulièrement intéressant pour les productions en petits lots où le temps de préparation est long et a par conséquent un fort impact sur le coût final du fait de la faible quantité à produire. [VIL 03] note que cette automatiser implique une multitude de critères conflictuels et d'objectifs contradictoires et qu'elle requiert une grande variété d'expertises et de connaissances qui ne sont pas simples à modéliser et à codifier.

[ALT 89] définit les tâches d'un système CAPP comme suit :

- Interprétation du modèle CAO,
- Sélection des procédés de fabrication,
- Sélection des machines-outils,
- Détermination et séquençement des opérations,
- Détermination de la cotation de fabrication,
- Détermination des conditions de coupe,
- Calcul des temps et des coûts,
- Génération des feuilles de gamme, d'opération, des programmes CN.

En comparant ces étapes avec les différents modules du processus USIQUICK, l'étape 1 correspond au module Transformateur, les étapes 2-3-4-5 au module Préparateur et les étapes 6-7-8 au module de Génération.

Par la suite nous étudions les approches et système de génération de gammes d'usinage et nous concluons cette première partie par la proposition de fournir un système d'aide performant au gammiste.

2. Approches en génération de gammes d'usinage

Au cours des 20 dernières années, la génération automatique de gamme a été abordée de différentes manières. La figure 5 illustre ces différentes approches.

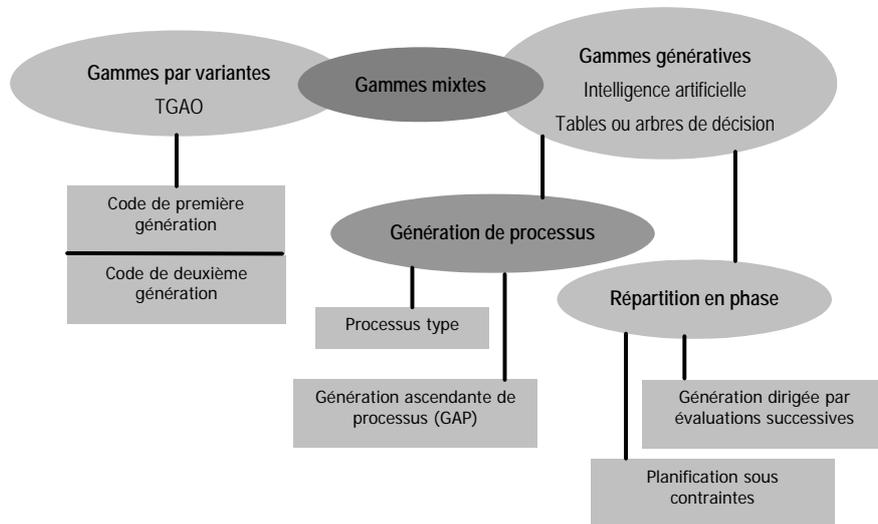


Figure 5. Concepts de génération automatique de gammes [VIL 03]

Les premiers travaux dans le domaine sont ceux de Neibel [NEI 65]. Les approches de génération de gammes d'usinage font l'objet de plusieurs études bibliographiques. Les différentes thèses soutenues dans le cadre du projet USIQUICK [CAP 05] [DER 05] [ZIR 06] les abordent selon des points de vue différents. Nous étudions ainsi dans la suite les deux familles d'approches de générations de gammes d'usinage : les approches par variantes et les approches génératives.

I. Les approches par variantes

Les premiers développements en génération automatique de gammes d'usinage ont abouti aux systèmes par variantes. Connus sous le terme de systèmes TGAO (Technologie de groupe assistée par ordinateur) [MUT 88], ils utilisent des bases de gammes préalablement conçues. Une présentation précise des systèmes TGAO est donnée dans [CHA 90]. Etant basé sur la morphologie des pièces et la réutilisation des gammes établies précédemment, cette approche ne convient qu'à l'industrialisation de pièces qui se ressemblent. Cette technique permet de standardiser la conception de produits nouveaux et surtout de générer des gammes type pour des familles de pièces. En revanche, comme elles s'appuient sur des gammes établies auparavant, on se heurte à des problèmes d'archivages (il doit être judicieux) et de temps (avant de fournir des résultats corrects il faut avoir capitalisé un nombre suffisant de connaissances). De plus la maintenance de la base de données associée est une tâche lourde. L'utilisation de ce concept requiert deux étapes difficiles à bien gérer : l'étape préparatoire et l'étape productive

L'étape préparatoire consiste à regrouper en familles les différentes pièces de l'entreprise, de les archiver et d'y associer un code morphodimensionnel. Par analyse des gammes des pièces d'une même famille, on crée une gamme enveloppe. Pour chaque famille un tableau croisé associant code et gammes enveloppes permet le calcul de gammes type (Figure 6).

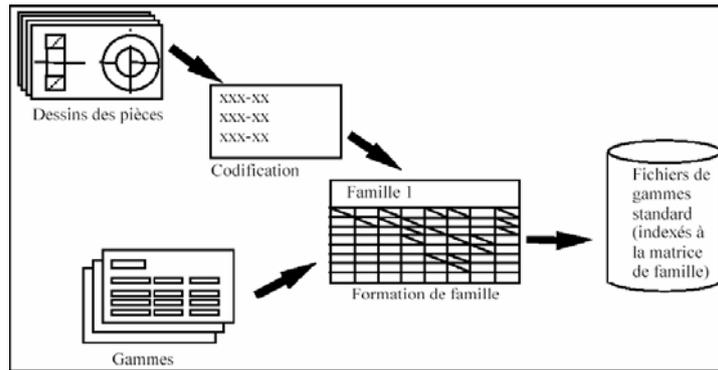


Figure 6. Etape préparatoire des systèmes TGAO, [CHA 90]

L'étape productive consiste à déterminer pour une nouvelle pièce son code morphodimensionnel, d'en déduire la famille à laquelle elle appartient, puis la gamme type associée. Une fois trouvée, celle-ci est modifiée afin de l'adapter à la nouvelle pièce. (Figure 7)

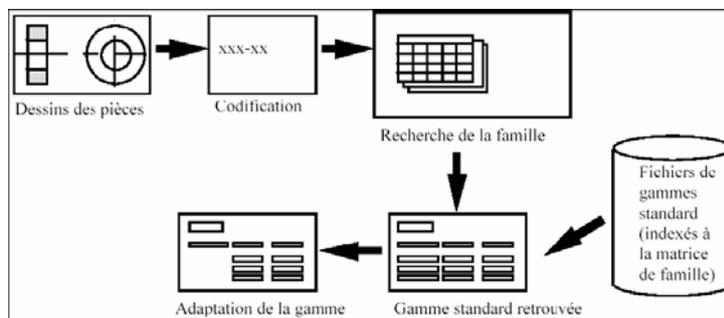


Figure 7. Etape productive des systèmes TGAO, [CHA 90]

Une évolution des approches TGAO est connue sous le nom de CBR (Case-Based Reasoning) [TIW 01]. Ces systèmes de raisonnement à base de cas utilisent les techniques de l'intelligence artificielle. Ils raisonnent sur le modèle CAO au lieu d'utiliser le code morphodimensionnel. Cette technique récente est autorisée par les avancées en intelligence artificielle et a pour origine les travaux sur les théories cognitives, et plus précisément sur la modélisation informatique de la mémoire humaine. Le concept est simple : lors de la résolution d'un nouveau problème, plutôt que de repartir de zéro, on recherche des problèmes similaires déjà traités, afin de retrouver les moyens de résolution ou la solution pour les appliquer ou les adapter au nouveau problème. Le nouveau problème, une fois validé, fait alors partie de la base de cas, ce qui permet à la base de se maintenir à jour automatiquement.

II. Les approches génératives

Les approches génératives consistent en une intégration du savoir-faire en génération de gamme. Ces approches créent une gamme par étude automatique de la pièce. Elles s'appuient sur un traitement de l'expertise métier suivant deux démarches majeures : l'une impérative (algorithmique), l'autre déclarative (système expert avec base de règles).

▪ Les techniques algorithmiques

Les systèmes algorithmiques recherchent un niveau de précision suffisant pour autoriser une mise

en production immédiate. Ils sont souvent spécialisés dans un domaine de fabrication (fraisage, tournage, etc....) et s'appuient sur des bases très documentées de données technologiques (coupe, outils, machines...). L'application de génération de gamme se succède en étapes consécutives sans possibilité de retour en arrière. La connaissance est décrite selon un des deux moyens les plus courants : les arbres et les tables de décision. L'intégration de la connaissance dans le code en « dur » est un handicap majeur pour le développement de cette approche. Une modification de la règle elle-même, ou de la priorité de cette règle, nécessite une re-compilation du système, ce qui est pratiquement impossible. Plusieurs travaux ont étudié l'application des techniques algorithmiques : APPAS [WYS 77], AUTAP [EVE 80], CPPP-CMPP [DUN 78]. Une étude spécifique concernant le domaine du tournage est effectuée dans LURPA-TOUR [ANS 94] [CHE 92] [MOG 94].

▪ **Les systèmes experts**

Le premier système expert connu est GARI [DES 81], ses descendants sont PROPEL [TSA 87] [BRI 90] puis GAGMAT [DUR 90]. Une structure caractéristique d'un système expert en gamme est constituée par :

- une base de faits pour la connaissance de la pièce,
- une base de règles et de faits sur la génération de gamme,
- un mécanisme d'inférence

Le principe d'un système expert se base sur la séparation des connaissances et du raisonnement. Les approches peuvent être ascendante, descendante ou un mixte des deux.

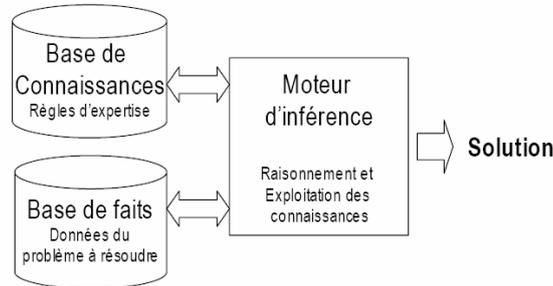


Figure 8. Structure d'un système expert [CAP 05]

Faire une gamme en approche ascendante signifie que la génération de la gamme se fait à partir de l'état fini de la pièce pour parvenir à l'état brut de celle-ci. Une gamme descendante fait l'inverse.

La base de règles pour la détermination de la gamme se présente souvent sous forme de règles de production. Mais les dernières évolutions (années 90) tendent à privilégier deux techniques informatiques :

- l'utilisation de la programmation par contraintes pour exprimer les interactions fortes entre les entités manipulées,
- l'utilisation du formalisme "objet" (langages et base de données).

3. Systèmes de génération de gamme d'usinage

Dans cette partie, nous analysons succinctement certains systèmes de génération de gamme d'usinage (en ordre alphabétique croissant).

- **CIMSKIL TM (Technology Answers)**

Ce logiciel a été développé en partie dans le cadre du projet américain HiThru [HIT 04], mené initialement pour répondre aux problèmes des industries manufacturières du secteur militaire : la fabrication rapide et à moindre coût de pièces de rechange pour des avions de chasse. Parmi les tâches d'un système CAPP, les points forts de ce logiciel sont la reconnaissance d'entités 3 et 5 axes et les séquences d'opérations d'usinage des entités qui sont automatiquement créées et affectées des conditions de coupe adéquates

- **emPOWER-MACHININGTM (Tecnomatix)**

Ce logiciel, issu des développements du prototype académique PART [HOU 89], est un système génératif de gammes d'usinage à base de règles. Il dispose d'un système automatique et efficace de reconnaissance d'entités volumiques 2½ axes. Le choix de la machine et de la prise de pièce doit être réalisé par l'homme de métier. Les étapes suivantes peuvent s'enchaîner de manière totalement automatique, l'homme n'ayant qu'à contrôler et valider les résultats à chaque étape. La détermination des processus utilise la technique de génération ascendante. Le système produit automatiquement les trajectoires, puis les programmes CN de la pièce, les instructions opérateur et toutes les informations (liste d'outils...) nécessaires pour la fabrication.

- **IMOLD CAPP System [GAN 01]**

Ce système est capable de générer une gamme d'usinage détaillée. Il considère le séquençement, les machines, les directions d'usinage et les outils. Intégrable dans plusieurs environnements, ce système utilise des techniques d'optimisation de temps de production. Les temps de calcul sont raisonnables, et une comparaison avec les algorithmes génétiques (d'après une étude des éditeurs du système) favorise IMOLD CAPP System. Comme la majorité des systèmes, ce logiciel ne traite pas les pièces complexes.

- **LURPA-TOUR [ANS94]**

Issu de la recherche menée au LURPA à l'école normale supérieure de Cachan, ce logiciel concerne uniquement les pièces de révolution. Ce système génère une gamme de tournage complète. L'approche consiste à formaliser l'expertise du gammiste sous forme de centres de décision, qui sont des ensembles de règles de décision permettant de choisir une action et une seule parmi les actions prévues dans le champ d'actions, en fonction de l'état situationnel correspondant au contexte et aux décisions antérieures.

- **OMEGA [SAB 95]**

Mené en partenariat entre Citroën Industrie (PSA) et l'ENS de Cachan, ce système utilise une approche générative décomposée en deux domaines. Le premier consiste à définir le mode

opérateur des entités d'usinage. Le deuxième revient à définir automatiquement le séquençement des opérations d'usinage en « posages » en utilisant une stratégie de planification sous contraintes. Ce système utilise les fonctionnalités du modelleur CATIA.

- **PROPEL [TSA 87]**

PROPEL concerne les pièces prismatiques. Il est le résultat d'un effort académique de recherche mené au laboratoire 3S de Grenoble. Il utilise une approche générative basée sur des règles de production. La reconnaissance des entités de prise de pièce et la gestion de ces entités en conception de gammes d'usinage, ainsi que l'identification des difficultés d'usinage sont maintenant intégrées dans PROPEL [PAR 03].

- **PSG-CAPP [SAD 02]**

Basé sur une approche générative, PSG-CAPP est composé de trois modules. Le premier module concerne l'extraction des entités. Les deux autres proposent un posage, sélectionnent une machine, proposent les outils coupants à utiliser, définissent les paramètres d'usinage et génèrent la gamme d'usinage. Le logiciel est développé avec VB 6.0 et Oracle 7.3 est utilisé pour les bases de connaissances. Le logiciel est interfacé avec Solidworks d'où les entités sont automatiquement extraites du modèle géométrique. Ce logiciel a été testé dans le domaine aéronautique, mais sur des pièces prismatiques et non pas 5 axes contenant des formes gauches.

4. Discussion

Cette étude des systèmes CAPP nous permet de dégager les remarques suivantes :

1. Les études menées concernent rarement la géométrie complexe des pièces aéronautiques. Ces dernières qui nécessitent des attentions particulières quant aux formes gauches et minces défavorisent alors l'usage de tous les systèmes recensés,
2. Le risque d'explosion combinatoire pour les approches par variantes défavorise l'usage de ces méthodes. Ainsi que le maintien difficile des bases de données de gammes type,
3. Les références dans ce domaine datent. Ce sujet qui redevient un sujet d'actualité n'a été que peu étudié ces dix dernières années,
4. La flexibilité d'un système expert, et l'usage de l'intelligence artificielle, promettent des résultats exacts. Surtout avec la montée en puissance de calcul des machines informatiques,
5. L'automatisation étant un objectif ambitieux, la tendance vers un système semi-automatique semble plus judicieuse.

Ces remarques nous font renoncer à l'idée d'une automatisation complète, et tendre vers un système interactif. La flexibilité des systèmes experts est prometteuse, cependant, dans le cadre d'USIQUICK, on a opté – dans un premier temps – pour un système génératif à base de techniques algorithmiques.

B. Les entités d'usinage

La chaîne numérique d'un système FAO [BER 02] doit comporter un « Pré-processeur géométrique et technologique » pour la conversion du modèle CAO de la pièce en un modèle compréhensible et utilisable par les métiers de la post-conception (Figure 9). [SAD 02] affirme que l'incapacité à mettre en place un système efficace de reconnaissance des entités composant la pièce est l'une des causes principales de l'échec des systèmes CAPP. Ces 2 assertions mettent en évidence l'adaptation nécessaire du modèle CAO à l'activité de fabrication, adaptation difficile (et peut-être impossible) qui doit conduire à un modèle par entités. Dans cette partie nous allons approfondir la notion d'entité et nous focaliser essentiellement sur les entités d'usinage et leurs moyens d'obtention.

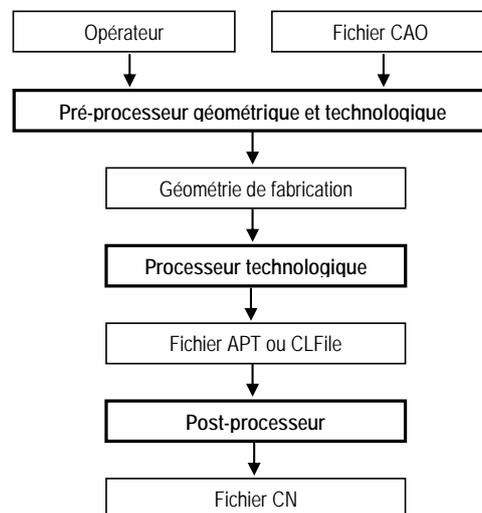


Figure 9. Structure générale d'un système de FAO [BER 02]

1. La modélisation par entité

Une entité est un moyen de communication naturel entre les intervenants de divers métiers, et reste fortement liée à l'application, au métier, voire à l'entreprise [TOL 98]. La modélisation par entité ou feature modelling est particulièrement bien adaptée à la modélisation des connaissances liées au produit pour les systèmes de gammes d'usinage, car ce concept supporte la complexité du problème qui est intimement liée au modèle produit, aux bases de données technologiques et à la formalisation de l'expertise de fabrication [ANW 00]. Etant commune à plusieurs domaines, une entité est sémantiquement différente suivant le point de vue où on se place. Un trou alésé vu comme la surface complémentaire de la barre de guidage par le concepteur, est vue comme un alésage résultant du travail d'un foret puis d'un alésoir par le gammiste [BRI 92].

[SHA 88] caractérise les entités ainsi :

- une Entité est un constituant physique d'une pièce,

- une Entité dérive d'une forme générique,
- une Entité a une signification en ingénierie,
- une Entité a des propriétés prévisibles.

Il existe un nombre quasi-illimité de types d'entités, en effet il est toujours possible de définir un type qui réponde à de nouveaux besoins et qui mémorise les informations désirées. La liste ci-dessous vise à présenter un certain nombre d'entités très caractéristiques des domaines de la conception et de la fabrication.

I. Entités liées à l'activité de conception

Entité de conception fonctionnelle : Ensemble d'entités relatives a des fonctions spécifiées par le cahier des charges d'un produit, elles doivent contenir l'intention de conception et les paramètres non géométriques relatifs à la fonction et aux performances attendues.

Entité topologique : Elles expriment les relations topologiques entre et dans les entités. [JON 92]

Entité de peau : Subdivise les différentes surfaces des pièces en fonctionnalités. Qu'elles soient cinématique, esthétique ou sécuritaire [BEL 94], les entités de peau permettent d'exprimer un certain nombre de contraintes sur certaines surfaces spécifiques.

Entité de liaison : C'est une entité qui ne peut pas être évaluée ou physiquement réalisée tant que toutes les variables du modèle ne sont pas spécifiées. [SHA 91]

Entité de tolérance : Les entités de tolérance fixent les écarts admissibles sur la forme définie, les dimensions et le positionnement.

II. Entités liées à l'activité de fabrication

Entité d'assemblage : ensemble d'entités de types différents permettant de définir les relations existant dans un assemblage comme les conditions d'accouplement, les positions et orientations relatives entre composants, les différents types de positionnement et les relations cinématiques.

Entité d'usinage : [GAM 90] une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquelles un processus d'usinage est connu ; ce processus est quasi indépendant des processus d'usinage des autres entités.

Entité de prise de pièce : une entité de prise de pièce est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels une qualité de posage et de bridage est connue [PAR 95].

III. Autres types d'entités (cette liste est bien entendu non exhaustive)

Entités Matériaux : la composition matérielle, les traitements qu'une pièce a subis et les conditions d'états de la pièce sont des informations caractéristiques présentes dans les entités matériaux

Entités technologiques : données relatives à un ensemble incluant les informations relatives aux contraintes admissibles en terme de RDM par exemple, les entités technologiques sont des données utiles au calcul CAO des différentes pièces.

Entités administratives : les entités administratives regroupent des informations telles que les références, les fournisseurs, les délais d'approvisionnement éventuels, qui sont nécessaires à la gestion temporelle de la pièce au sein de l'entreprise.

2. Les entités d'usinage

I. Différentes définitions

[GAO 98] définit les entités d'usinage comme un volume continu qui peut subir un enlèvement de matière par une opération d'usinage simple suivant une prise de pièce bien définie, tandis que [GAM 90] les voit comme la recherche d'un processus capable à partir d'informations sur la forme géométrique et ses spécifications. Pour [TOL 98], à une entité d'usinage sont associés différents attributs comme le type d'usinage, les directions d'usinage, la qualité exigée, attributs qui permettent de définir entièrement la géométrie de l'entité et les caractéristiques attendues.

Pour [SHA 95] les entités d'usinage sont une collection d'éléments géométriques liés auxquels correspondent une méthode ou un processus de fabrication particulier. Ces ensembles d'éléments géométriques constituent les données d'entrée des logiciels devant définir les méthodes ou les procédés de fabrication appropriés pour créer la géométrie attendue.

Une justification du concept d'entités d'usinage, qu'on retrouve très souvent, est que pour raisonner et traiter convenablement les pièces il faut remédier à la pauvreté de la représentation. [PAR 95] par exemple note que : « la notion d'entité d'usinage, élément essentiel du raisonnement du gammiste, a permis de s'affranchir de la pauvreté de la représentation de la pièce proposée par le concepteur ».

[BAG 97] indique 2 conditions pour la reconnaissance des entités d'usinage : une d'existence du processus d'usinage et une d'indépendance entre les processus d'usinage de différentes entités de la pièce.

II. Taxinomie

[SRI 04] classe les entités en trois grandes familles:

- Les entités qui constituent une forme interne débouchante (internal through passage) nommées Cut-Thru. Elles sont caractérisées par une seule entrée et une seule sortie quelque soit l'orientation de la pièce. Elles imposent des restrictions fortes sur le choix de l'outil et l'accessibilité.
- Les entités qui constituent une cavité bornée (blind cavity) nommées Cut-On. Ce sont typiquement les cavités fermées non accessibles. Elles se caractérisent par la présence d'au

moins une face accessible suivant une seule direction. Cette famille se divise en 3 sous catégories :

- les cavités fermées bornées (Closed blind cavities) nommées Closed Cut-On. Elles représentent tous les types de poches fermées.
 - les cavités ouvertes nommées Open-Cavity qui constituent les formes partiellement ouvertes comme les rainures et les marches.
 - les faces ouvertes nommées Open-Surface qui représentent les faces extérieures avec une accessibilité quasi totale.
- Les entités qui constituent une forme externe accessible (external part boundary) nommées Cut-Around. Elles constituent les frontières externes de la pièce, leur usinage dépend principalement des éléments de mise en position et de fixation sur le montage d'usinage.

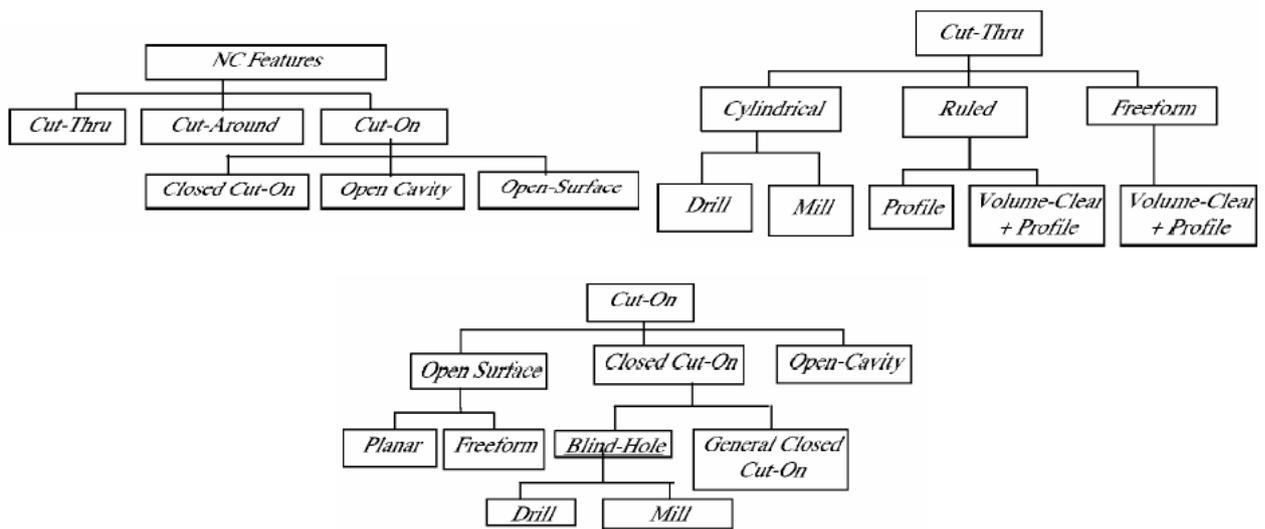


Figure 10. Taxinomie des entités d'usinage [SRI 04]

III. Caractéristiques des entités d'usinage

[SHA 95] classe les caractéristiques des entités d'usinage en caractéristiques intrinsèques (propres à l'entité) et extrinsèques (liées à l'entité et à son environnement).

Les caractéristiques intrinsèques sont : le type de l'entité (rainure, poche, trou, ...), la forme géométrique associée à l'entité, l'état brut de l'entité et la gestion de ses états, la qualité technologique intrinsèque de l'entité et les paramètres de matériaux.

Les caractéristiques extrinsèques sont : Le positionnement de l'entité dans la pièce, les interactions topologiques de l'entité avec les entités voisines et les informations liées à son processus d'obtention.

3. Différents types de techniques de création des entités d'usinage

Les techniques de création des entités peuvent être réparties en trois catégories : la création interactive d'entités, la reconnaissance automatique des entités et la conception par entités.

I. Création interactive d'entités

Le point de départ de la création interactive d'entités est un modèle purement géométrique. Un utilisateur, à l'aide d'un modèleur géométrique, définit le modèle géométrique, puis un autre utilisateur ou lui-même construit sur celui-ci le modèle d'entité à l'aide d'un système textuel ou graphique interactif.

Il faut noter que la création interactive d'entités se fait avec intervention humaine.

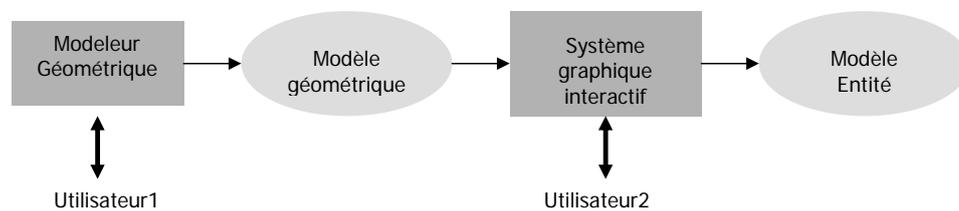


Figure 11. Création Interactive d'Entités [SHA 95]

II. Reconnaissance automatique d'entités

Cette technique de reconnaissance d'entités se fait sans intervention humaine. Elle se subdivise en deux domaines : la reconnaissance de zones à usiner et la reconnaissance d'entités prédéfinies.

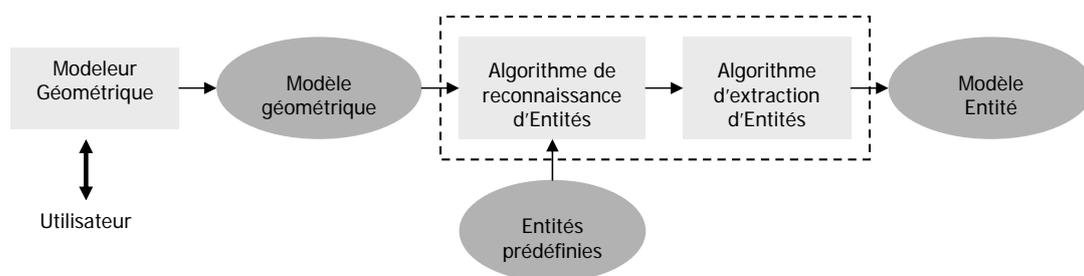


Figure 12. Reconnaissance Automatique d'Entités [SHA 95]

III. Conception par Entités

La conception est faite directement par assemblage et combinaison d'entités, le modèle géométrique est extrait des entités.

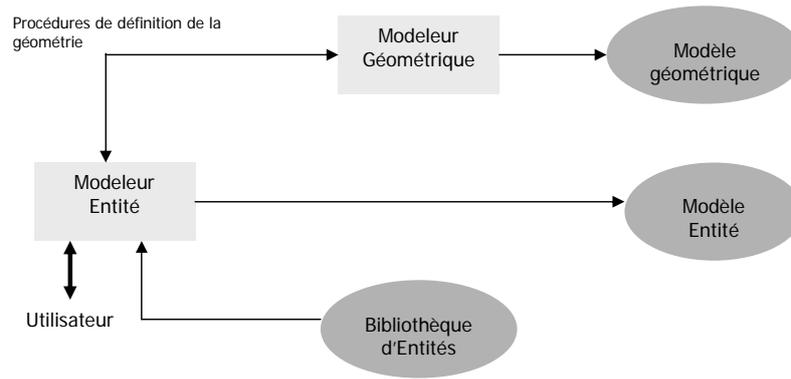


Figure 13. Conception par Entités [SHA 95]

4. Techniques de reconnaissance automatique des entités d'usinage

[SHA 01] divise les techniques de reconnaissance automatique des entités d'usinage en six groupes de base : topologique, heuristique, symbolique, volumique, centré processus, et hybride (Figure 14). Chacune de ces méthodes se subdivise en sous classes. Nous allons détailler quelques unes de ces approches.

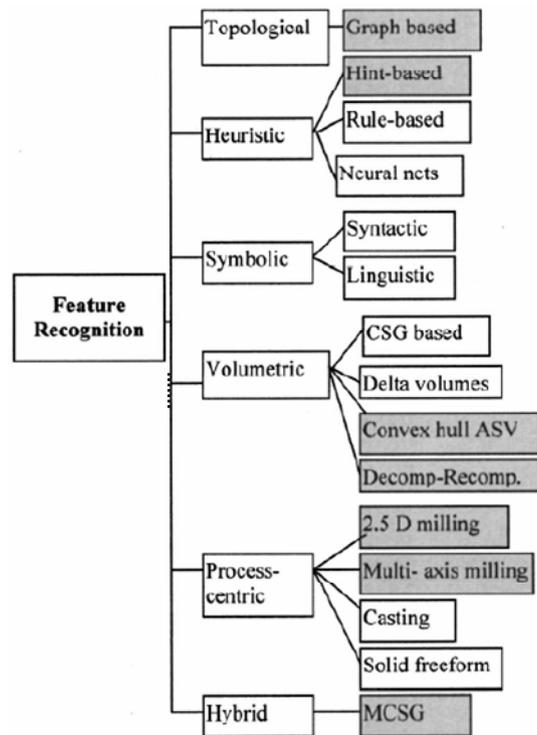


Figure 14. Taxonomie des techniques de reconnaissance d'entités selon [SHA 01]

I. Les approches topologiques

Ces approches de reconnaissance sont basées sur l'isomorphisme des sous graphes [OZT 01]. Du modèle B-Rep est déduit un graphe de la pièce. Les faces sont les noeuds du graphe tandis que les

relations entre faces forment les arcs du graphe d'adjacence de faces (FAG en anglais, pour face adjacency graph). Le FAG complété par des informations additionnelles devient alors un AAG (Attributed face Adjacency Graph). [WU 96] indique qu'une entité est d'abord modélisée sous forme de graphe qui représente les contraintes topologiques et géométriques qui la caractérisent. Ensuite on cherche le sous graphe qui lui correspond le mieux dans la structure FAG de la pièce en utilisant les algorithmes issus de la théorie des graphes.

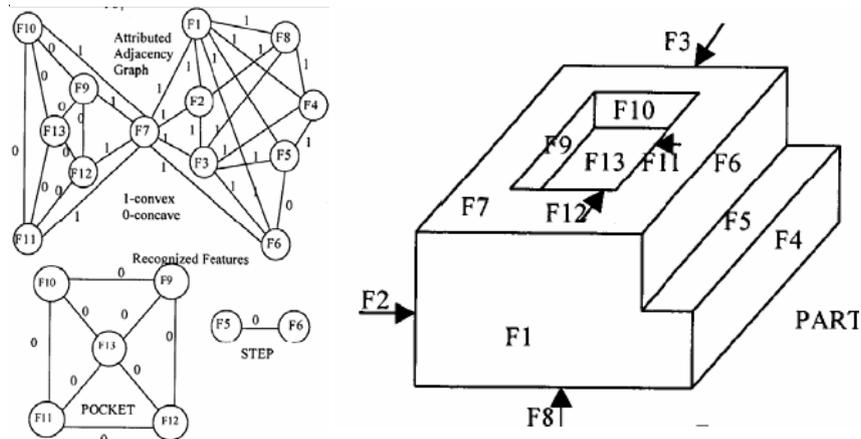


Figure15. Exemple d'un AAG graphe d'une poche fermée.

[FLO 89] a introduit une structure de graphe appelée « Graphe Arête-Face Généralisée » pour reconnaître les protusions ou les dépressions sur une face. [GAV 90] propose aussi une autre approche à base de graphe pour l'extraction de protubérances et de dépressions. Les travaux de [DEN 93] ont porté sur la caractérisation des entités d'usinage constituées de faces présentant un angle matière supérieur à 180° (cette notion de vicinité sera expliqué au cours de la présentation du modèle FAO USIQUICK au chapitre 2). [ANW 00] a utilisé le graphe AAG de la pièce pour rechercher des entités de formes. Ces techniques utilisées par les approches à base de graphe sont incorporées dans PART (revoir paragraphe 1.3).

II. Les approches heuristiques

Ces approches peuvent être basées sur les règles, qui analysent directement un modèle par le biais de règles de reconnaissance et de liaison.

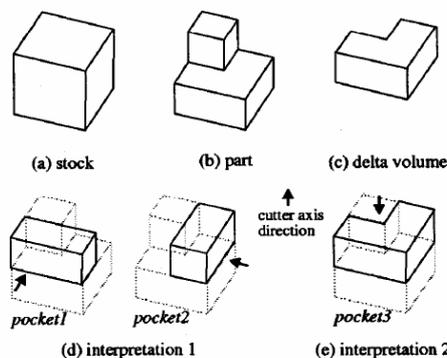


Figure 16. Le problème d'interprétations multiples [HAN 00]

Les entités sont formalisées par des règles bien définies et des liaisons sont aussi définies pour palier aux problèmes d'intersection et de liaison entre les différentes entités (entités dégradées). Une liaison est un indice appartenant à la géométrie nominale, c'est l'indicateur de l'existence possible d'une entité. Ayant plus de liaisons que d'entités à reconnaître ces méthodes doivent faire face à de multiples interprétations éventuelles.

III. Les approches volumiques

Les approches volumiques calculent un brut englobant la totalité de la pièce, puis essaient de reconstituer la pièce d'origine en identifiant les volumes à enlever au brut pour obtenir la pièce finie. On classe ces approches en trois catégories : les méthodes par décomposition convexe, les méthodes par décomposition cellulaire et les méthodes basées sur un arbre CSG.

- **Les méthodes par décomposition convexe**

C'est une méthode algorithmique qui décompose un volume en lui soustrayant ses composants convexes. Au début, on crée un volume convexe (VC1) de la pièce, après soustraction du volume VC1 de la totalité du volume de la pièce, il résulte un volume V_{p^*} . Le volume convexe du volume V_{p^*} est alors créé et on réapplique l'étape précédente. Le processus est répété jusqu'à l'obtention d'un volume vide. Les volumes obtenus sont utilisés pour générer des entités d'usinage.

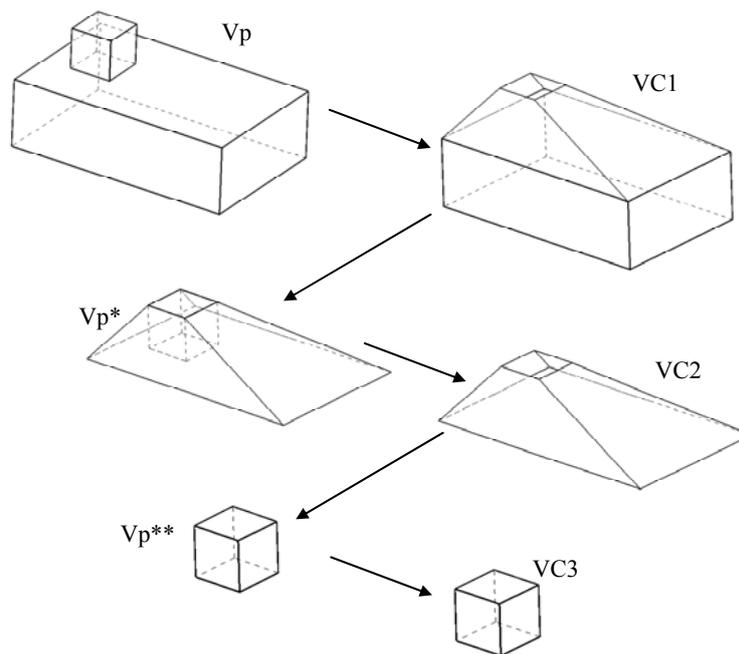


Figure 17. Exemple de décomposition en enveloppes convexes

Cette méthode, comme le montre l'exemple figure 18 ci-dessous, peut entrer dans un cycle infini qui n'aboutit pas à une solution finale.

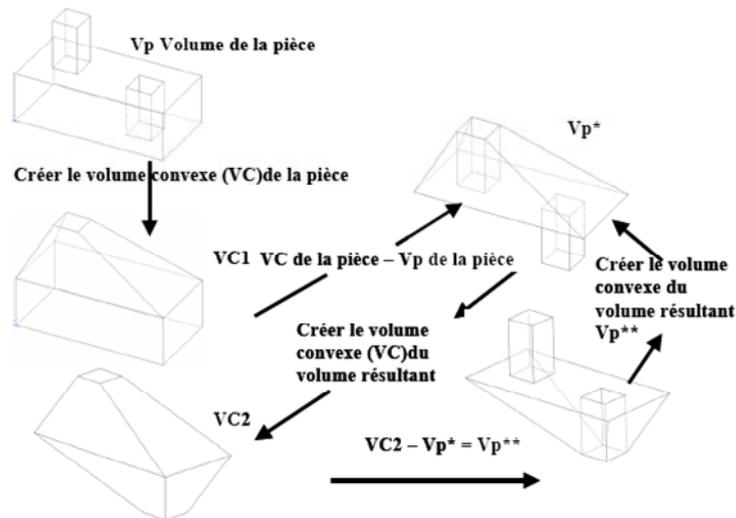


Figure 18. Contre-exemple d'une décomposition en enveloppes convexes

- **Les méthodes par décomposition - recombinaison cellulaire**

Etudiées initialement par General Dynamics dans le cadre du projet CAM-I [GEN 85], elles se déroulent en trois étapes : décomposition du volume de poche en cellules, regroupement des cellules, puis reconnaissance d'entités [VAN 94].

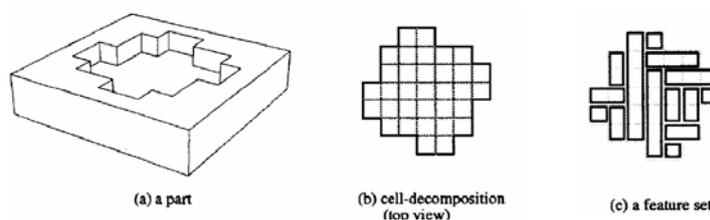


Figure 19. Exemple de décomposition cellulaire

- **Les méthodes basées sur un arbre CSG**

Elles essaient de transformer l'arbre CSG (Constructive Solid Geometry) de définition de la pièce en un arbre aux nœuds duquel l'expression CSG de chaque entité est distincte. [PER 90] a développé une technique qui permet de reconnaître 18 entités d'usinage de pièces prismatiques transformant un arbre CSG en un arbre DSG (Destructive Solid Geometry). La multiplicité de la représentation d'un arbre CSG et la non unicité de définition pour des pièces identiques semble avoir entraîné l'abandon de la recherche sur la reconnaissance des entités d'usinage dans un modèle CSG.

- **Les approches hybrides**

Les approches hybrides mélangent les approches préalablement citées. On essaie de remédier aux inconvénients de certaines approches en comblant ce manque par les résultats d'une autre. [GAO 98] combine une méthode de reconnaissance basée sur les graphes avec une reconnaissance par traces. Les traces sont définies à l'aide d'un graphe d'adjacence avec attributs étendus EAAG

(Extended AAG – détails dans les approches topologiques) complété par l'adjonction de liens virtuels correspondant aux entités disparues par interactions. Pour reconnaître les entités, on extrait des sous graphes MFAG (Manufacturing Face Adjacency Graph) du graphe EAAG. L'étude des MFAG permet de repérer les interactions entre les différentes entités. Pour reconstruire les entités en interaction, on construit le MCSG (Minimal Condition Sub-Graph) issu de l'EAAG de la pièce. Ce MCSG est par la suite utilisé comme une trace par une approche heuristique.

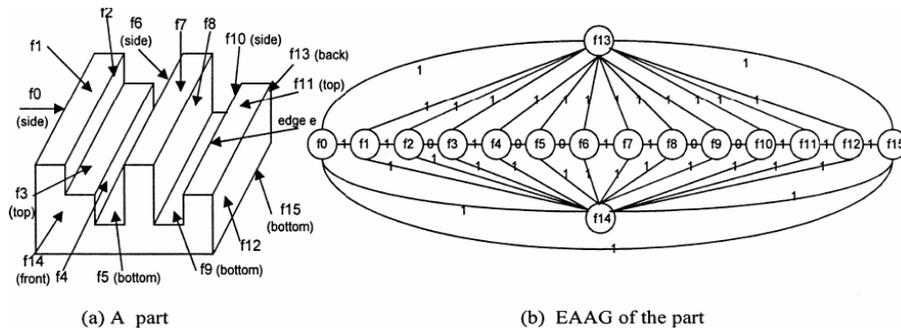


Figure 20. Exemple de graphe EAAG d'une pièce selon [GAO 98]

5. Discussion

De cette étude bibliographique des entités d'usinage nous tirons les conclusions suivantes :

1. La modélisation par entités peut être vue comme une réponse pour rétablir le dialogue entre les fonctions de conception et la gamme ; mais en conception les entités d'usinage ne sont pas utilisées ce qui induit un problème de sémantique,
2. Les différentes techniques d'extraction des entités d'usinage ne sont pas adaptées à la morphologie complexe des pièces mécaniques dans le domaine aéronautique, comme la démontré la discussion sur ces différentes techniques menées par [SHA 01],
3. Une solution est peut-être un enrichissement au niveau microscopique (faces) des pièces mécaniques qui induit la nécessité du concept d'entité d'usinage élémentaire mis en place avec les différents partenaires du projet USIQUICK.

C'est la solution retenue dans le cadre du projet USIQUICK, on définira un modèle FAO support du passage de la CAO vers la gamme basé sur le concept d'entité d'usinage élémentaire : EUE.

B. Etude de l'analyse de fabricabilité

Pour remédier aux problèmes de fabrication provenant des limites techniques imposées par les moyens de production et de la nécessité de diminuer les coûts de fabrication, plusieurs recherches ont exploré la voie « DFM » (Design For Manufacturing). Les décisions prises lors de la conception peuvent impliquer une augmentation significative du coût de la réalisation et parfois l'échec de la fabrication. Par exemple, un concepteur peut fort bien placer un trou carré sur la pièce qu'il conçoit. La réalisation d'un tel trou étant quasi-impossible, un système DFM interdira au concepteur de placer des trous carrés.

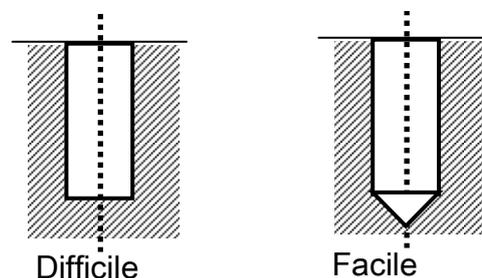


Figure 21. Exemple d'une conception difficile (trou borgne) à réaliser et présentation d'une solution mieux adaptée

L'analyse de fabricabilité dans un système de CAO classique est une activité préliminaire pour réussir l'intégration de la fabrication dans la conception. [BRI 03] explique que, traditionnellement, la FAO est vue comme le processus de passage d'une géométrie théorique spécifiée à une géométrie usinée conforme. Aujourd'hui, dans un contexte de compétition industrielle, le processus de passage engendre des coûts et des délais de fabrication inacceptables. [ZIR 06] explique que ce processus de passage est séquentiel et itératif. Le passage de la phase de conception conceptuelle au produit final à fabriquer se fait par itérations entre les concepteurs et les ingénieurs de fabrication. Les cycles de production, séquentiels, entraînent de nombreux aller-retour d'informations entre les acteurs CAO et FAO. En mettant en place la démarche Concurrent Engineering, le monde industriel cherche à intégrer l'activité de FAO dans l'activité de CAO pour satisfaire les exigences qui sont de fabriquer en un temps court des produits à bas coût ayant une bonne fiabilité.

La méthodologie DFM (Design For Manufacturing, Concevoir pour Fabriquer) apporte une réponse aux exigences industrielles. Cette méthodologie concerne le concepteur qui a la charge d'affiner la définition d'un produit CAO pour assurer sa faisabilité, sa fabricabilité et réduire les coûts de production. [BRI 03] explique que la démarche DFM, consiste dans un premier temps à faire une analyse du produit afin de rendre compatibles la définition du produit et la définition de son processus de fabrication. La méthodologie DFM s'assimile généralement à évaluer la faisabilité d'industrialisation du produit. [GUP 95] énonce que l'analyse de fabricabilité d'une conception proposée implique de déterminer si cette conception est fabricable ou pas.

1. Orientations principales d'un système DFM

Les fonctionnalités principales qu'un système DFM doit satisfaire sont :

Diminutions du nombre de pièces dans l'assemblage. Plus il y a de composants dans un assemblage plus il y a de possibilités de se tromper lors de l'assemblage physique et de placer un composant défectueux. L'obtention d'un produit « bon » diminue exponentiellement par rapport au nombre de pièces qui subsistent.

Usage de matière commune. L'usage de matière traditionnelle (i.e. titane, aluminium) dans le domaine commun facilitera la tâche de l'étude.

Élimination des câbles et des ajustements. Diminuer le plus possible le nombre de câbles réduit le temps d'assemblage et donc le coût. De même, l'élimination des ajustements diminue considérablement la complexité de l'assemblage.

Usage des ressources d'usinage. En étudiant bien les moyens de production existant au sein de l'entreprise, on cherche à éliminer les entités complexes non fonctionnelles difficilement réalisables dans le contexte de production. On doit également chercher à ne pas avoir de définitions de pièces ayant des tolérances de fabrication irréalisable avec les procédés disponibles.

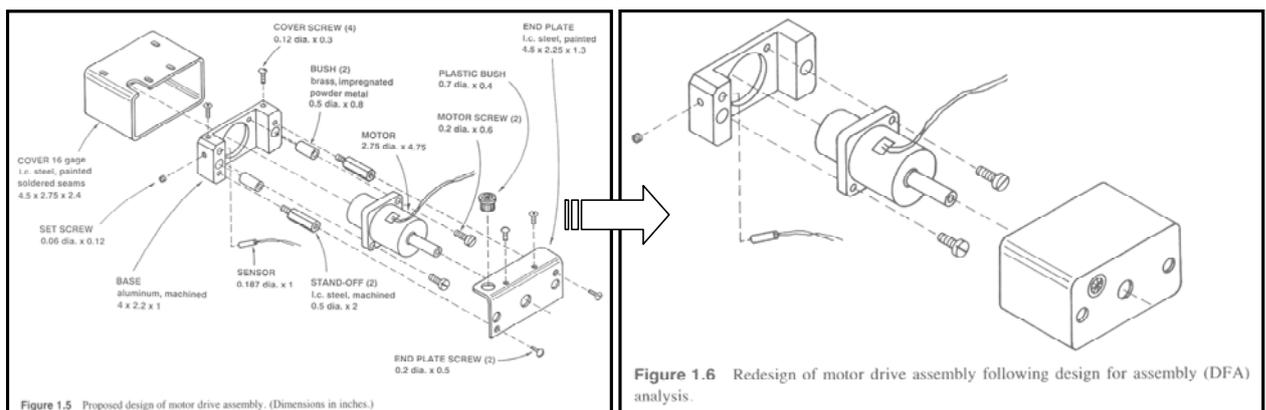


Figure 22. Conception et re-conception de la pièce « motor drive » [BOO 94]

Une application de ces directives sur l'exemple de la figure 22 ci-dessus [BOO 94] illustre ce concept, ils engendrent une réduction du coût de la pièce étudiée de 35.44 USD à 21.73 USD, soit une réduction de 38%.

2. L'évaluation de la fabricabilité

[DFM 94] présente sept éléments d'évaluation de la fabricabilité :

- **coût de production**, il doit être minimal en incluant les coûts directs et indirects,
- **la qualité** et le respect des spécifications,
- **la flexibilité** de s'adapter aux changements de la production,
- la capacité de limiter **les risques**,
- un **délai de fabrication** court,
- **l'efficacité** dans l'usage des ressources humaines et des capitaux de l'entreprise,
- minimiser **les effets environnementaux**.

3. Méthodes d'analyse de fabricabilité

De nombreuses recherches, dans la littérature scientifique, existent pour évaluer la fabricabilité. Ces méthodes d'analyse de fabricabilité se décomposent en deux sous-ensembles : les systèmes à base de règles et connaissances (approche qualitative) et les systèmes basés sur l'analyse géométrique et l'optimisation du coût (approches quantitatives). Cette partie s'attache plutôt aux méthodes basées sur l'analyse géométrique car elles sont plus dans l'optique de ce mémoire.

[GUP 95] propose d'étendre le modèle produit en incorporant les résultats de l'analyse de fabricabilité qui s'appuie sur une analyse de la géométrie et des tolérances spécifiées. Il suppose que toutes les informations relatives à la conception et aux ressources de fabrication sont disponibles.

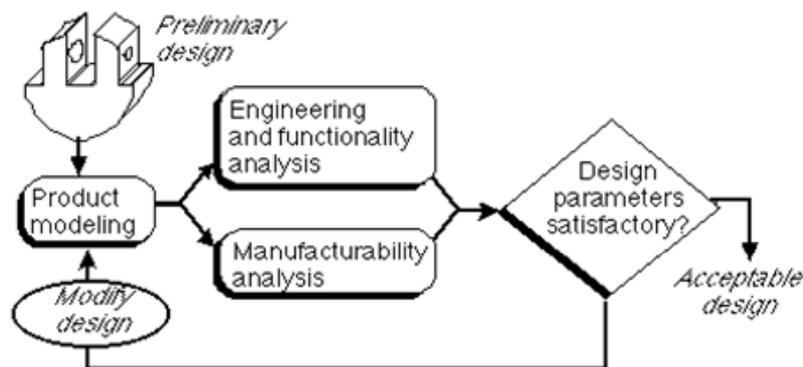


Figure 23. Proposition de Gupta et Nau, pour l'extension de la boucle de la conception.

L'approche présentée (figure 23) consiste à générer des solutions alternatives à partir d'une collection d'entités d'usinage, puis de cartographier chaque interprétation dans des gammes d'usinage et ensuite d'évaluer la fabricabilité pour chaque gamme. Le système d'analyse de la fabricabilité est IMACS [GUP 95b]. Un des objectifs fondamentaux d'IMACS est de développer une méthodologie pour systématiquement produire et évaluer des gammes d'usinage alternatives pour les pièces usinées. Le système d'analyse de fabricabilité automatique détermine:

- Si les attributs de conception (forme, dimensions, tolérances, finition des surfaces) peuvent être réalisés.
- Une estimation de la fabricabilité (si la conception est déclarée réalisable) reflétant la facilité (ou la difficulté) avec laquelle la conception peut être usinée.
- Les attributs de conception qui posent des problèmes de fabricabilité si la conception est déclarée non fabricable.

Cependant, cette approche ne fait pas ressortir les difficultés d'usinage, car la base d'entités d'usinage n'est pas assez développée et ne détecte pas les entités d'usinage particulières. En revanche, ce système est utile pour comparer et faire des interprétations des gammes d'usinage.

Les travaux de [ZOU 03] ont abouti à un outil central basé sur la reconnaissance d'entités d'usinage pour générer des propositions de re-conception pouvant transformer une conception contenant des formes non usinables en une conception fabricable. Leur approche est développée dans un produit logiciel (ARM, Automated redesign for machined part) de re-conception pour les

pièces usinées. Le progiciel utilise les informations issues de l'identification des formes qui ne peuvent pas être usinées avec l'équipement disponible. Par l'étude des modes d'usinage (flanc, bout) et des directions d'usinage, ce système détermine si les faces sont usinables ou non.

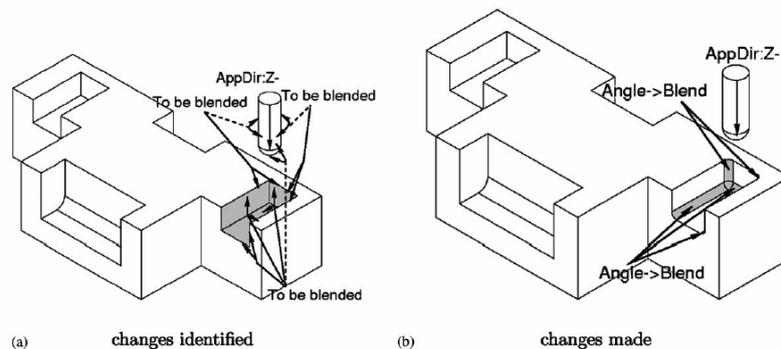


Figure 24. Re-conception de faces non usinables

Avec ce système l'utilisateur dispose d'une option automatique de re-conception par ajout d'éléments de conception. Les études ne sont menées que sur des pièces prismatiques et par conséquent la spécificité du domaine aéronautique – pièces 5 axes souvent complexes – n'est pas étudiée.

[GRA 05] note que l'intégration entre les systèmes de CAD et de CAM est réalisée au moyen de la transformation d'un modèle CAD en un modèle présenté comme une collection de relations et d'entités. Leur principe est basé sur deux méthodes :

La première est d'identifier, pour un produit donné, un produit existant similaire. Le processus d'usinage correspondant permet alors de déterminer les spécifications.

La deuxième méthode est basée sur les entités de construction et les entités technologiques :

- les entités de construction contiennent les informations de formes et les relations de construction entre elles et autour d'elles,
- les entités technologiques contiennent les informations sur l'état initial et l'état final de la forme et les actions technologiques qui les transforment de l'une à l'autre. Elles contiennent les informations de type : forme géométrique, tolérances, outils, ainsi que tolérances technologiques.

Par ces deux méthodes, [GRA 05] construit ainsi un arbre de structure reflétant l'organisation des formes élémentaires (chanfrein, congé etc.) et définit en conséquence la gamme de fabrication.

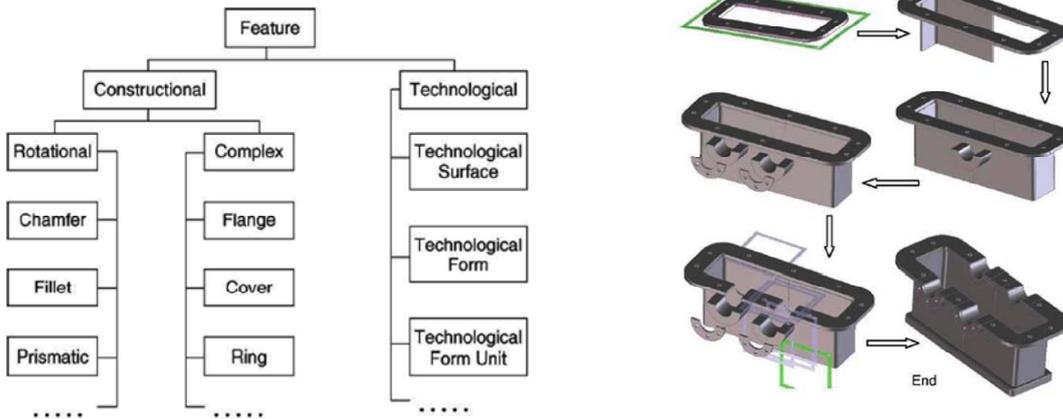


Figure 25. Arbre de structure pour la génération de processus de fabrication.

4. Discussion

L'analyse de fabricabilité fait partie des méthodes DFM qui ont fait l'objet d'innombrables travaux de recherche. Ces travaux se dirigent plus vers la spécification de méthodes globales d'optimisation du processus de conception. Nous tirons les conclusions suivantes suite à l'étude de l'analyse de fabricabilité:

1. les systèmes d'aide à l'analyse de fabricabilité aujourd'hui concernent les pièces prismatiques simples. Le domaine aéronautique nécessite des systèmes d'analyse au niveau des pièces complexes 5-axes,
2. il est important de pouvoir vérifier au plus tôt la faisabilité des opérations d'industrialisation et de pouvoir la démontrer,
3. les analyses géométriques n'identifient pas des difficultés d'usinage telles les entités minces (Chapitre 2, partie C).

Ainsi, l'industrie aéronautique a besoin d'outils d'aide à l'évaluation et à l'amélioration de la fabricabilité de ses pièces usinées. Avec l'absence de tels outils, une opportunité de recherche se trouve grande ouverte pour de futurs travaux. Certaines des fonctions CAPP élaborées dans ce mémoire pourront participer à un système d'analyse de fabricabilité.

C. L'usinage en flanc

L'usinage en flanc (UEF) est un processus d'usinage où la face usinée est obtenue en travail de forme par la denture latérale de la fraise (le flanc de l'outil). Ce mode d'usinage constitue, avec l'usinage en bout (UEB), 98% des usinages de pièces mécaniques 5 axes chez Dassault Aviation.

[TON 01] et [GON 05] ont comparés les deux modes Usinage par balayage (que nous noterons UQ pour usinage quelconque) et UEF. Ils remarquent que l'avantage principal de l'UQ est que n'importe quelle surface complexe peut être usinée selon ce mode d'usinage. Les désavantages sont la qualité de la surface obtenue et le temps d'usinage conséquent. Cette comparaison est menée pour les faces non planes. Nous montrons le tableau comparatif de [TON 01] dans le tableau ci-dessous.

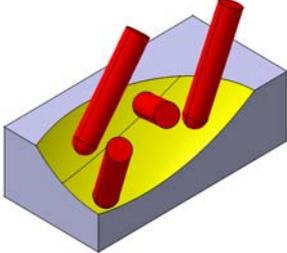
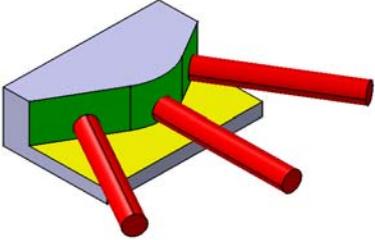
Tableau comparatif [TON 01]		
	Usinage en balayage	Usinage en flanc
		
Temps	Temps d'usinage long provenant du grand nombre de passes	réduction du nombre des passes, environ 14 fois
Coûts	Coûts élevés dus également au grand nombre de passes et à la nécessité d'effectuer une fonction manuelle	réduction des coûts de 75%
Qualité	Surface à crêtes dues au rayon en bout de la fraise	Meilleur état de surface, diminution du temps des opérations de meulage et de polissage

Tableau 1. Tableau de [TON 01]

L'usinabilité en flanc n'est possible que sur des faces quasi-réglées développables [BED 03]. La première partie de ce paragraphe va par conséquent définir une surface réglée développable.

La deuxième partie est consacrée aux différents travaux concernant l'usinage en flanc, on y notera l'absence complète d'études concernant l'application de ce mode d'usinage sur les faces planes.

1. Etudes de la géométrie des faces réglées développables

I. Définitions des faces réglées développables

On peut définir les faces « réglées développables » selon deux points de vue : mathématique ou métier [HAR 05a].

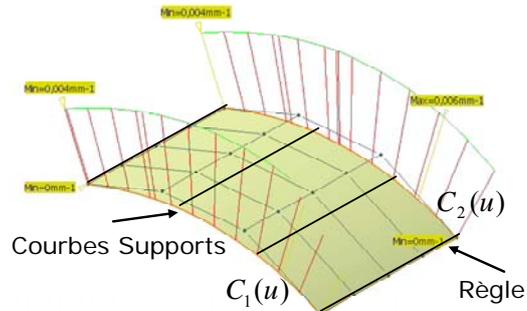


Figure 26. Face réglée. Les règles s'appuient sur les courbes supports

Mathématiquement une face réglée est définie par le déplacement d'un segment dans l'espace (la droite support de ce segment est appelée règle) [PET 99], habituellement la règle s'appuie sur deux courbes guides de l'espace $C_1(u)$ et $C_2(u)$ (Figure 26). Pour une valeur u_0 du paramètre u la règle passe par $C_1(u_0)$ et $C_2(u_0)$. Les faces réglées développables sont des faces réglées, dont les directions des normales à la face en tout point de la règle sont parallèles. Une surface développable peut être « déroulée » et « mise à plat » dans un plan sans modification de sa surface [POT 05].

La représentation paramétrique d'une face réglée est donnée par :

$$\vec{S}(u, v) = \vec{C}_1(u) + v \cdot (\vec{C}_2(u) - \vec{C}_1(u)), u \in [a; b], v \in [c; d] \quad (1)$$

Elle est développable si :

$$\vec{S}'(u_i, v) = \lambda \vec{S}'(u_j, v), \forall u_i \neq u_j \quad (2)$$

Pour un expert métier, une face F est considérée comme réglée développable s'il est possible de définir un usinage en flanc UF tel que l'écart entre la face engendrée par UF et la face F soit dans un domaine de tolérance admissible spécifié par la qualité dimensionnelle de la face exigée.

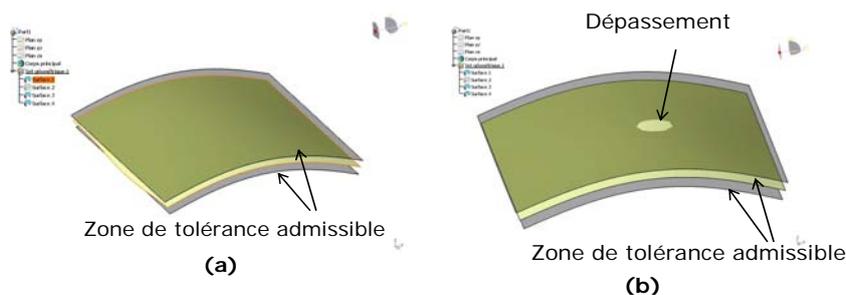


Figure 27. Définition métier de la face réglée: (a) La face est réglée car l'écart entre la face CAO et la face usinée est inférieur à la tolérance. (b) La face n'est pas réglée car l'écart est supérieur à la tolérance.

II. Identification du type géométrique de la face

L'étude de la courbure d'une face F en différents points qui la constituent permet de déterminer si elle est réglée. Les valeurs et les directions de la courbure permettent de distinguer 3 types de faces réglées :

Une face F est réglée si en tout point de F la courbure minimale est nulle. Les règles sont les courbes intersection de F avec le plan osculateur N contenant la courbure nulle. L'étude de la « développabilité » de F n'intervient que si la face est réglée. Dans ce cas, on calcule les normales N_i à la face F en différents points le long de la règle R_i . Si les vecteurs N_i ont la même direction, F est alors développable.

Une face réglée F est cylindrique si les courbures tout au long du plan osculateur P perpendiculaire au plan N sont égales. Une face cylindrique est forcément développable.

Une face réglée F est plane si les courbures minimales C_{\min} et maximales C_{\max} en tout point de F sont nulles. Une face plane est une face réglée très particulière puisque la direction des règles est quelconque.

Un troisième type particulier de faces réglées est la face conique. Certaines de ces faces sont souvent usinées avec une fraise conique d'angle égal au cône. Dans ce cas elles seront traitées comme des faces cylindriques, sinon leur traitement sera inclus dans l'étude de l'accessibilité des faces réglées générales.

2. Travaux dans le domaine de l'usinage en flanc

Le peu de recherches dans le domaine de l'usinage en flanc concerne essentiellement le calcul de la trajectoire outil pour la réalisation de la face. Elles se placent toujours dans le cas général où il n'y a pas d'obstacle au passage de la fraise.

Nous présentons ces différents travaux selon la répartition suivante :

- Les travaux menés à l'université de Waterloo
- L'évaluation et la déformation de la trajectoire outil
- La prise en compte des efforts de coupes

I. Les travaux menés à l'Université de Waterloo [BED 03] [MEN04] [LI 05]

Le premier algorithme présenté par [BED 03] donne l'équation de la surface, résultat du travail en flanc d'un outil cylindrique sur une face réglée non développable. Bien que l'équation soit complexe, les auteurs présentent une méthode d'obtention de la courbe empreinte. Cette courbe étant hélicoïdale, les auteurs en déduisent qu'un outil cylindrique ne pourra jamais usiner une surface réglée non développable. Les auteurs estiment que pour un pas de l'hélicoïde réduit, la surface obtenue peut être fidèle au modèle CAO.

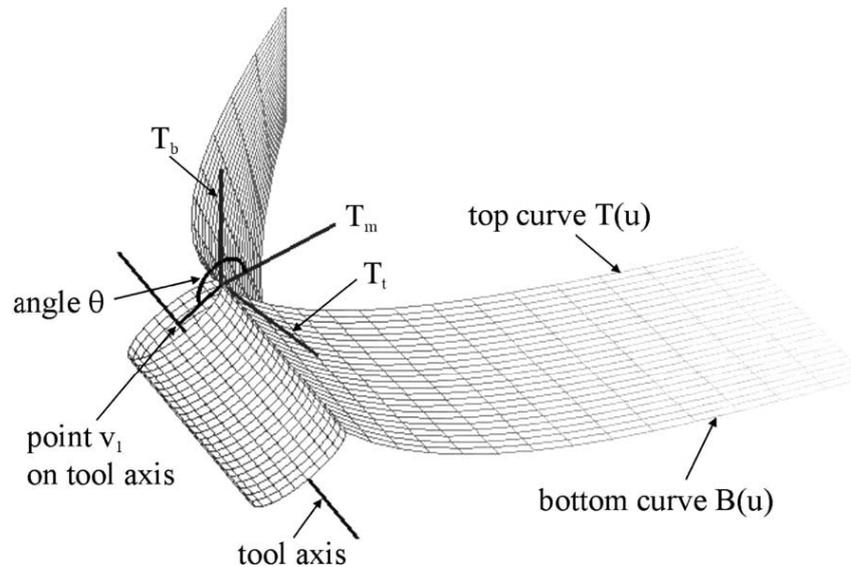


Figure 28. [BED 03] stratégie d'usinage en flanc

Le travail de [BED 03] a été optimisé par la suite par [MEN 04] qui a supprimé la contrainte consistant à faire rouler le cylindre sur les courbes guides $B(u)$ et $T(u)$. Le nouvel algorithme optimise en trois étapes la position de l'outil pour usiner la face au mieux. L'application de cette '3 Step Method' (figure ci-dessous) optimise la déviation, d'après les auteurs, et assure l'obtention d'une face usinée « supérieurement » fidèle par rapport à la méthode de [BED 03].

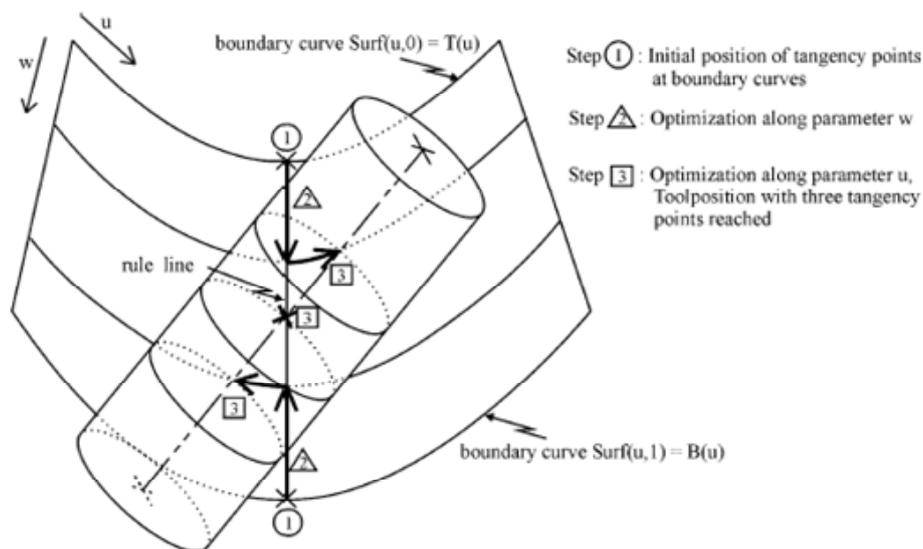


Figure 29. 3 Step Method de [MEN 04]

Finalement [LI 05] étudie trois méthodes différentes pour mesurer les erreurs. Il propose deux stratégies appelées 'tangent plane method' et 'notion method' qui toutes deux détectent les erreurs clairement. Elles utilisent les approximations linéaires en deux dimensions, la différence est que la première fait porter les deux dimensions sur la face à usiner tandis que la deuxième fait porter une des deux dimensions par les règles de la surface réglée.

II. Evaluation et déformation de la trajectoire d'outil [LAR 03b] [GON 05] [SEN 05]

Comme pour les travaux présentés dans la section I, [LAR 03b], [GON 05] et [SEN 05] ont développé des méthodes pour positionner l'outil de manière à obtenir un usinage fidèle de la face définie par la conception.

Ces travaux ont pour point commun l'utilisation de surface enveloppe décalée d'une valeur d selon la normale de la surface CAO S d'origine pour le positionnement potentiel de l'outil d'usinage. Bien que cette approche semble 'juste' elle présente plusieurs hypothèses limitantes par rapport aux cas réels rencontrés dans l'industrie. Les faces réglées pour l'usinage sont rarement ouvertes sans obstacles. En plus, le positionnement de l'axe outil n'est pas toujours parallèle aux règles de la surface S (d'où les travaux de [MEN 04]). [GON 05] présente la méthode TPO, difficilement différentiable des idées de [BED 03]. Par contre les travaux de [LAR 03b] sont particulièrement intéressants. En positionnant virtuellement l'outil, et en comparant le résultat de sa trajectoire, ils calculent le déplacement pour chaque point et optimisent la trajectoire de l'outil en prenant en compte la valeur de ce déplacement.

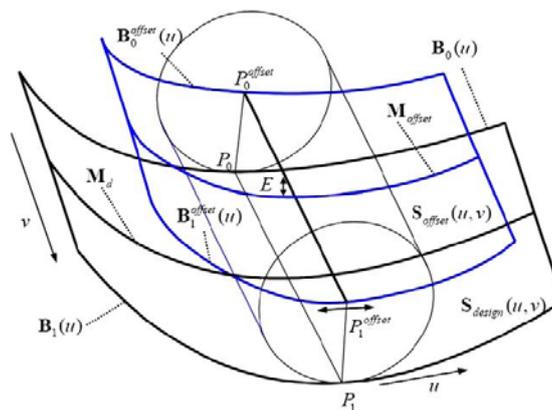


Figure 30. Positionnement sur la surface offset de la surface CAO [GON 05]

III. Prise en compte des efforts de coupes [LAR 03] [LAR 05]

Larue [LAR 03] et [LAR 05] prend en compte les conditions de coupes et la valeur des forces en flanc pour le calcul de la déviation entre la surface CAO et celle usinée.

[LAR 03] remarque que les défauts de planéité observés sont principalement dus aux vibrations de l'outil pendant le processus d'usinage. Il identifie un modèle de force des efforts en flanc pour la prévision des défauts de l'outil pendant l'usinage qu'il améliore dans [LAR 05]. Le travail poursuit un double but : la prise en compte des contraintes industrielles de temps et de coût et une révision des hypothèses prises. Ces travaux étudient l'usinage d'une surface plane suivant une direction d'usinage constante, hypothèse très restrictive. Cette hypothèse limite l'effort subi par l'outil à une force unidirectionnelle. Cette force implique une valeur de la déflexion outil. La proposition de [LAR 03] est de prendre en compte la valeur de cette déflexion outil dans le calcul de la charge appliquée à l'outil. Il prouve plus tard, que cette hypothèse augmente considérablement la précision et la fidélité du résultat d'usinage.

3. Discussion

Nous tirons les conclusions suivantes suite à l'étude de l'usinage en flanc :

1. L'usinage en flanc n'est applicable que sur des faces réglées développables. Les faces planes, cylindriques et coniques sont des faces réglées particulières, parfaitement développables,
2. Il existe peu de références dans le domaine de l'usinage en flanc. Ces références concernent essentiellement l'usinage de surfaces réglées générales et ne traitent pas le cas des surfaces réglées particulières. Cette absence d'étude des surfaces planes s'explique par l'existence d'une infinité de directions possibles en flanc. L'étude des directions d'usinage est une étape préliminaire majeure dans l'étude de l'usinage en flanc des faces planes,
3. Les études sont limitées à des faces ouvertes sans aucun obstacle. L'impact de ces obstacles influence énormément la trajectoire outil. L'étude de ce mode d'usinage doit prendre en compte les obstacles et la typologie de la pièce,
4. Les analyses du mode d'usinage en flanc se situent au stade de la fabrication dans le cycle de réalisation du produit. Notre approche est située en post-conception dans une étape de traitement géométrique et d'assistance aux logiciels CAPP,
5. L'étude des enchaînements de plusieurs faces potentiellement usinables en flanc est essentielle pour l'optimisation des contraintes industrielles. Les démarches présentées ne portent que sur une face.

D. Les approches d'accessibilité et de visibilité

Les approches d'accessibilité et de visibilité visent à étudier les techniques d'identification des zones non usinables par rapport à certaines directions d'usinage. Ces notions sont utilisées dans des domaines variés : mathématiques, informatique, robotique et productique entre autres. L'accessibilité est une notion complexe, elle est souvent difficile à calculer. C'est pourquoi, dans un premier temps, elle est souvent étudiée selon un concept plus simple : la visibilité. La direction d'usinage dans la figure ci-dessous est visible mais non pas accessible.

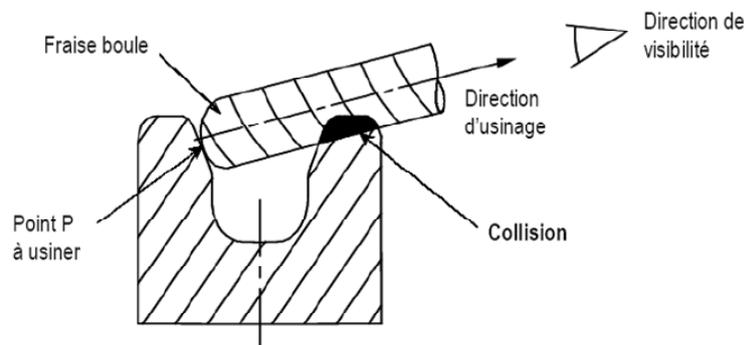


Figure 31. Visibilité et Accessibilité

Les notions d'accessibilité et de visibilité font l'objet d'études approfondies dans le domaine de la numérisation. [SPY 90] distingue les notions d'accessibilité locale et d'accessibilité globale :

- L'accessibilité locale d'un petit élément de surface ΔF est définie comme étant l'ensemble E des directions permettant de palper ΔF . E est l'ensemble des directions qui forment un angle inférieur ou égal à α avec la normale N à ΔF , α est fonction du domaine d'application. L'ensemble E définit le cône d'accessibilité locale (LAC).
- Le cône d'accessibilité globale (GAC) correspond aux directions pour lesquelles l'outil ou son support n'entrent pas en contact avec d'autres parties de la pièce.

[RIS 97] reprend cette notion d'accessibilité et définit, parallèlement, la visibilité locale et la visibilité globale. La visibilité globale d'une surface S_i est l'ensemble des directions appartenant à la visibilité locale de S_i qui n'entrent pas en contact avec les autres surfaces de l'objet. Ainsi, contrairement à l'accessibilité, la visibilité ne prend pas en compte le volume de l'outil mais seulement sa direction.

De nombreux travaux liés aux études d'accessibilité et de visibilité ont été réalisés ces dernières années au sein du CRAN, notamment ceux de [REM 04], [DER 05] et [CHA 06]. Ces études ont été menées dans un but d'optimisation de la numérisation.

Dans ce qui suit, nous précisons notre intérêt pour l'étude des approches d'accessibilité et de

visibilité. Dans un premier temps nous expliquons les études relatives à l'accessibilité en flanc d'un outil d'usinage, puis la représentation de la sphère d'accessibilité de la machine dans un deuxième temps.

1. Etudes relatives à l'usinage en flanc

Etudier la visibilité d'une face consiste à déterminer les directions qui permettront l'accès à cette dernière. Il existe deux approches pour estimer qu'une face (ou un élément) est visible ou non :

- se placer à distance et regarder si l'élément est visible (a),
- se placer sur l'élément et étudier son champ de visibilité (b).

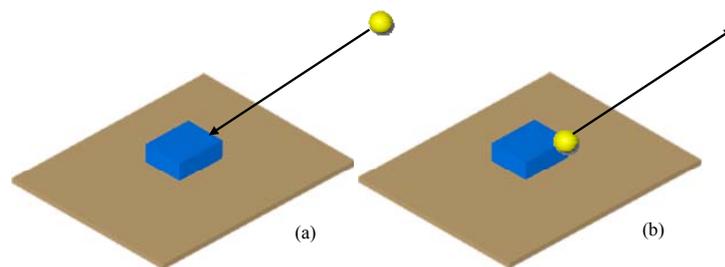


Figure 32. Approches de visibilité (le point jaune représente l'œil)

Notre problématique est d'étudier le champ de visibilité d'une face donnée par rapport à une direction donnée. Les deux approches seront utilisées en fonction de la logique d'usinage à prendre en compte. Plusieurs méthodes de calculs de visibilité sont pré intégrées dans les cartes vidéo des ordinateurs comme le Z-Buffering et d'autres méritent d'être étudié comme le lancer de rayon (ray tracing). Le lancer de rayon consiste à lancer un rayon depuis le point de vue vers l'objet. Le premier point de vue détermine la visibilité ou non de l'objet. En effet, si le rayon rencontre un obstacle, l'objet est alors non visible par rapport à cette direction. Le Z-Buffer permet de gérer la faille de l'algorithme du peintre : la séparation entre les éléments cachés et ceux qui doivent être rendus. En effet, au lieu de considérer les polygones comme une seule entité, cette méthode remplace le polygone par de petites facettes auxquelles est associée sa profondeur (en Z).

L'application de ces méthodes sert au calcul des champs d'usinage en flanc.

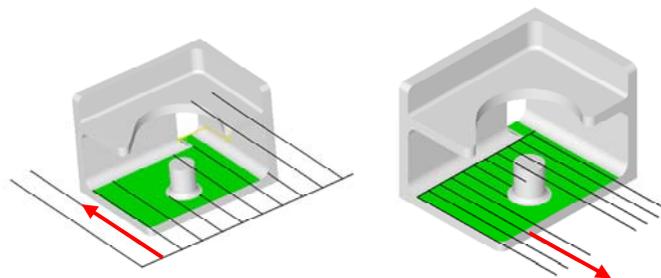


Figure 33. Calcul du champ d'usinage (page 82)

2. Etudes relatives à la sphère d'accessibilité

La table de visibilité est utilisée pour des méthodes qui discrétisent la pièce et la sphère unitaire, le plus souvent en triangles, de telle sorte qu'à chaque élément de la pièce soit associées un certain nombre de directions de visibilité. Ces directions de visibilité correspondent aux normales des triangles composant la sphère. C'est une matrice $N \times M$, où N représente le nombre de triangles composant la pièce, et M le nombre de triangles composant la sphère.

La table binaire de visibilité permet de stocker l'accessibilité de chaque face de la pièce par rapport à une direction de la sphère donnée. Si la i ème face est accessible depuis le j ème triangle, alors l'élément de la matrice correspondant à la i ème colonne et à la j ème face est mis à 1. Si la face n'est pas accessible, il est mis à 0.

[ELB 98] présentent une méthode permettant de déterminer l'ensemble des points de vue nécessaires pour scanner une surface complexe à l'aide d'un capteur laser. Ils expriment la contrainte intervenant sur l'angle d'incidence dans la notion d' α -sensibilité : pour une direction de scanning ν donnée, un point P appartenant à une surface S est dit α -sensible si et seulement si l'angle entre la normale à S au point P et la direction ν est inférieur à α . Si tous les points appartenant à une région R sont α -sensibles, alors R est elle aussi qualifiée d' α -sensible. En utilisant ce principe, ils proposent une méthode semi optimale permettant de décomposer une surface gauche S en régions α -sensibles. Dans un premier temps, [ELB 98] déterminent un ensemble de directions réparties uniformément sur toute la surface de la sphère de Gauss, en prenant en compte l'angle d'incidence limite du capteur laser, puis ils sélectionnent le nombre de directions suffisant pour scanner la surface S en considérant sa carte gaussienne.

[SUH 95] et [KAN 97] développent une approche pour l'analyse d'accessibilité qu'ils calculent en construisant des tables binaires de visibilité. Dans cette approche, la table est construite en projetant les centres de gravité de chacun des triangles sur la sphère unitaire.

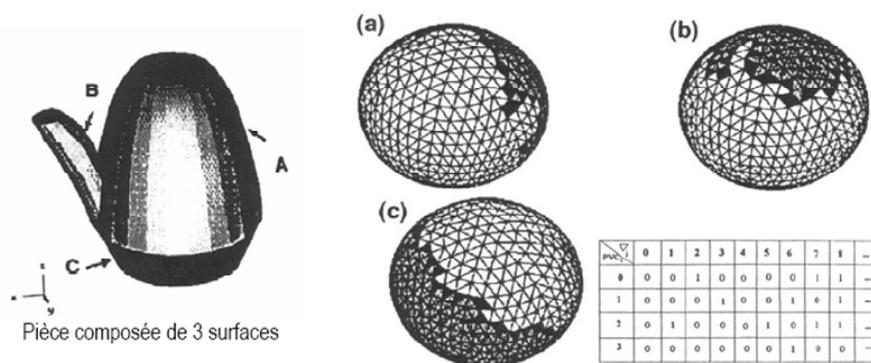


Figure 34. Tables binaires de visibilité [KAN 97]

3. Discussion

Les différentes notions présentées nous conduisent à tirer les conclusions suivantes:

1. La séparation entre les notions de visibilité et d'accessibilité nous permet de séparer l'étude de l'usinabilité en deux points: usinabilité sans prise en compte de la géométrie d'outil et, ensuite, avec la prise en compte de cette dernière. Dans un premier temps nous calculons l'usinabilité effective d'une face (cad les zones non usinables suivant une direction d'usinage) en assimilant l'outil à un fil (un outil de rayon nul). Dans un deuxième temps nous approfondissons l'étude de l'usinabilité en considérant la géométrie réelle de l'outil.
2. Les algorithmes mis en place pour le calcul de l'usinabilité en flanc testeront les deux approches de visibilité (de la face vers l'extérieur suivant la direction d'usinage et de l'extérieur vers la face). Ces approches seront mises en parallèle avec deux logiques différentes du préparateur : l'étude d'une direction pour la globalité d'une face ou pour une partie de cette face.
3. Nous utilisons une sphère d'accessibilité pour représenter les différentes directions d'usinage. La représentation des directions selon une sphère permettra à l'opérateur d'optimiser ses posages en combinant la sphère des directions avec celle de la cinématique machine.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la bibliographie relative aux notions utiles à notre travail de thèse. Elles constituent en partie le point de départ de notre recherche.

Le recensement des principaux travaux en génération automatique de gamme depuis les années 1980 montre les difficultés d'une automatisation complète, et que - dans un premier temps - il est plus raisonnable de tendre vers un système interactif préparateur/machine. Il ressort également que ces travaux concernaient rarement la géométrie complexe des pièces aéronautiques.

Nous abordons les différents concepts d'entités d'usinage et leurs techniques de création. Nous constatons que les entités d'usinage ne sont pas utilisées en conception, ce qui induit un problème de dialogue entre les fonctions de conception et la gamme. De plus la morphologie complexe des pièces aéronautique défavorise les différentes techniques d'extraction des entités d'usinage. En conséquence nous proposons le concept d'enrichissement élémentaire. Cette solution reprise et détaillée dans la suite constitue un des apports de notre travail.

De l'étude de l'analyse de fabricabilité, il ressort qu'aucun système n'est réellement adaptable au domaine aéronautique. Nous remarquons ainsi le besoin de l'industrie aéronautique en outils d'aide à l'évaluation et à l'amélioration de la fabricabilité de ses pièces usinées.

L'étude approfondie des techniques d'usinage en flanc et par balayage de faces met en évidence la non prise en compte de leur voisinage ainsi que la non existence de l'étude des directions d'usinage potentielles (pour les faces planes). Ces deux aspects constituent à eux mêmes deux vastes champs d'étude.

Finalement la séparation entre les notions de visibilité et d'accessibilité nous permet de séparer l'étude de l'usinabilité en deux points: usinabilité sans prise en compte de la géométrie d'outil et avec prise en compte de cette dernière.

Chapitre 2

Le Transformateur : **Aide à la prise en main de la pièce** **par l'opérateur pour la définition de** **la gamme d'usinage.**

- A. Caractérisation Géométrique
- B. Enrichissement technologique élémentaire
- C. Graphes d'enchaînements
- D. Interface Préparateur/Usiquick

Introduction

Un des objectifs du Transformateur est de raccourcir le temps de prise en main des pièces par le préparateur en lui fournissant un ensemble d'informations pour l'aider à déterminer rapidement la meilleure stratégie d'usinage. Aujourd'hui, la préparation des pièces mécaniques consomme beaucoup de temps. Pour certaines pièces on peut aller jusqu'à 20 jours. L'industrie aéronautique produisant des pièces en petite série, le temps passé à préparer la pièce intervient fortement dans le coût, raccourcir ce temps doit donc permettre des gains substantiels.

Plus généralement, le transformateur s'inscrit dans une démarche d'industrialisation de la fabrication. L'objectif final est de passer automatiquement ou tout au moins avec le minimum d'interventions de l'opérateur, de la pièce CAO à ses informations de fabrication : posage, programme CN, outillage... Le processus appliqué actuellement nécessite un traitement séparé de la gamme. La création d'un référentiel unique structurant progressivement l'information associée à la définition du produit et à son processus de réalisation est donc nécessaire pour la diminution du temps d'analyse de la pièce par le biais d'une réduction des rebouclages et autres itérations. L'intégration des gammes dans le même processus et la possibilité de vérifier l'industrialisation des pièces dès leur conception devrait générer des gains importants.

En permettant la prise en main virtuelle de la pièce, le transformateur va se substituer en partie à l'opérateur en effectuant automatiquement une analyse de la pièce. Il va fournir une visualisation 3D colorée de celle-ci où les couleurs apporteront un ensemble d'informations importantes significatives pour l'opérateur en ce sens qu'elles vont l'aider à mieux comprendre la géométrie pièce. D'autres informations importantes comme les directions d'usinage viendront compléter cette visualisation. Cette analyse étant systématique, l'opérateur sera sûr que toute la pièce a été analysée et qu'aucune face n'aura été oubliée ce qui est souvent le cas lorsque l'analyse est faite uniquement par observation de la pièce à l'écran.

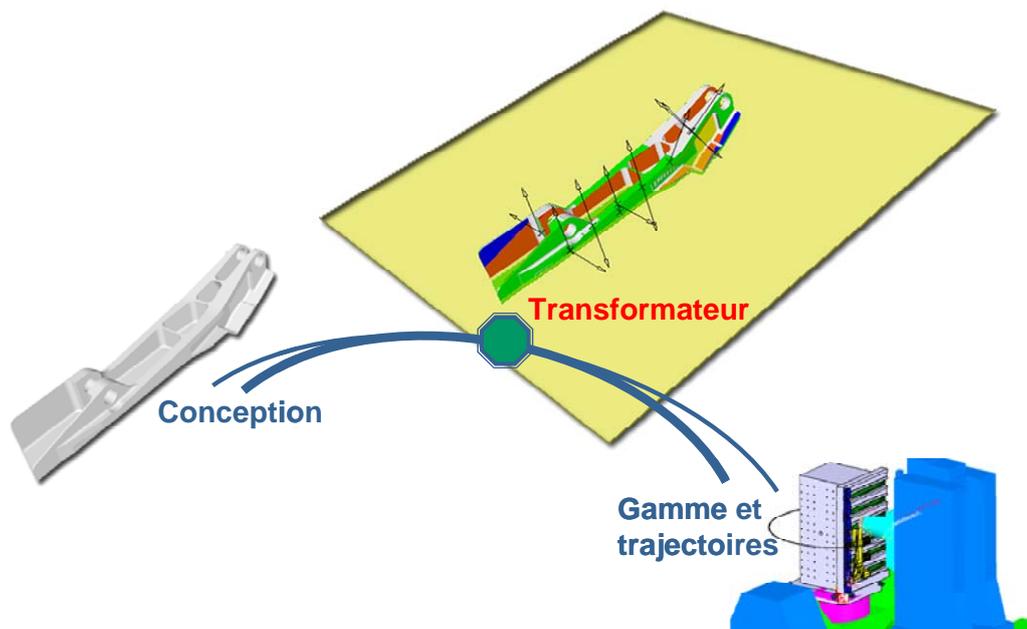


Figure 35. Le transformateur : Etape visuelle d'assistance à la génération de gamme et trajectoires

Lorsque le préparateur regarde sa pièce à l'écran, il a tendance à considérer alternativement les faces seules et des ensembles de faces. Ses réflexions sont du «genre» :

1. Pour une face seule :
 - a. La face U est uniquement usinable en bout, elle pourra être usinée avec une fraise de fort diamètre,
 - b. La face V est plane et constitue potentiellement un support de posage,
 - c. La face W est usinable aussi bien en bout qu'en flanc,
 - d. Pour être usinée totalement, la face X devra être usinée en partie en flanc et en partie en bout.
2. Pour un ensemble de faces :
 - a. L'ensemble des faces X, Y et Z constituent un haut d'aile, elles devront être usinées en premier lieu,
 - b. La face U constitue un fond de poche, V et W sont des faces adjacentes à U,
 - c. L'ensemble des faces usinable en flanc I, J, K et L son adjacentes 2 à 2, leur usinage pourra être enchaîné.

Pour aider le préparateur, il nous semble important que le transformateur calcule systématiquement un ensemble d'informations de ce type et qu'il les visualise à la demande de l'opérateur de manière à lui présenter une vue orientée « usinage » de la pièce. Cette vue « usinage » pourra être ciblée vers une activité particulière : usinage en bout, détection des hauts d'aile ... par exemple.

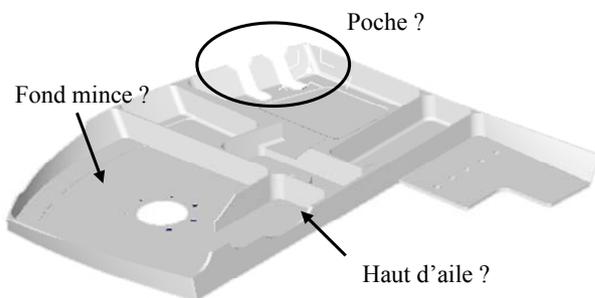


Figure 36. Prise en main de la pièce, clef de voute de la génération de gamme

Dans ce chapitre, nous étudions cette approche et proposons les mécanismes permettant à partir de la géométrie pièce d'origine de déterminer et de lui associer un ensemble d'attributs caractéristiques importants pour la fabrication. L'obtention de cette nouvelle géométrie de fabrication se fait selon 3 étapes :

Une première étape, A, caractérise la géométrie afin notamment :

1. de distinguer les faces planes et réglées qui ne s'usinent pas de la même manière que les autres faces,
2. d'identifier les congés ou fillets qui sont des entités de raccordement entre faces « fonctionnelles » et qui seront usinés simultanément avec ces dernières,

- de caractériser les arêtes dont la forme (droite, circulaire, quelconque) et la jonction à leurs faces adjacentes influencent directement le mode d'usinage.

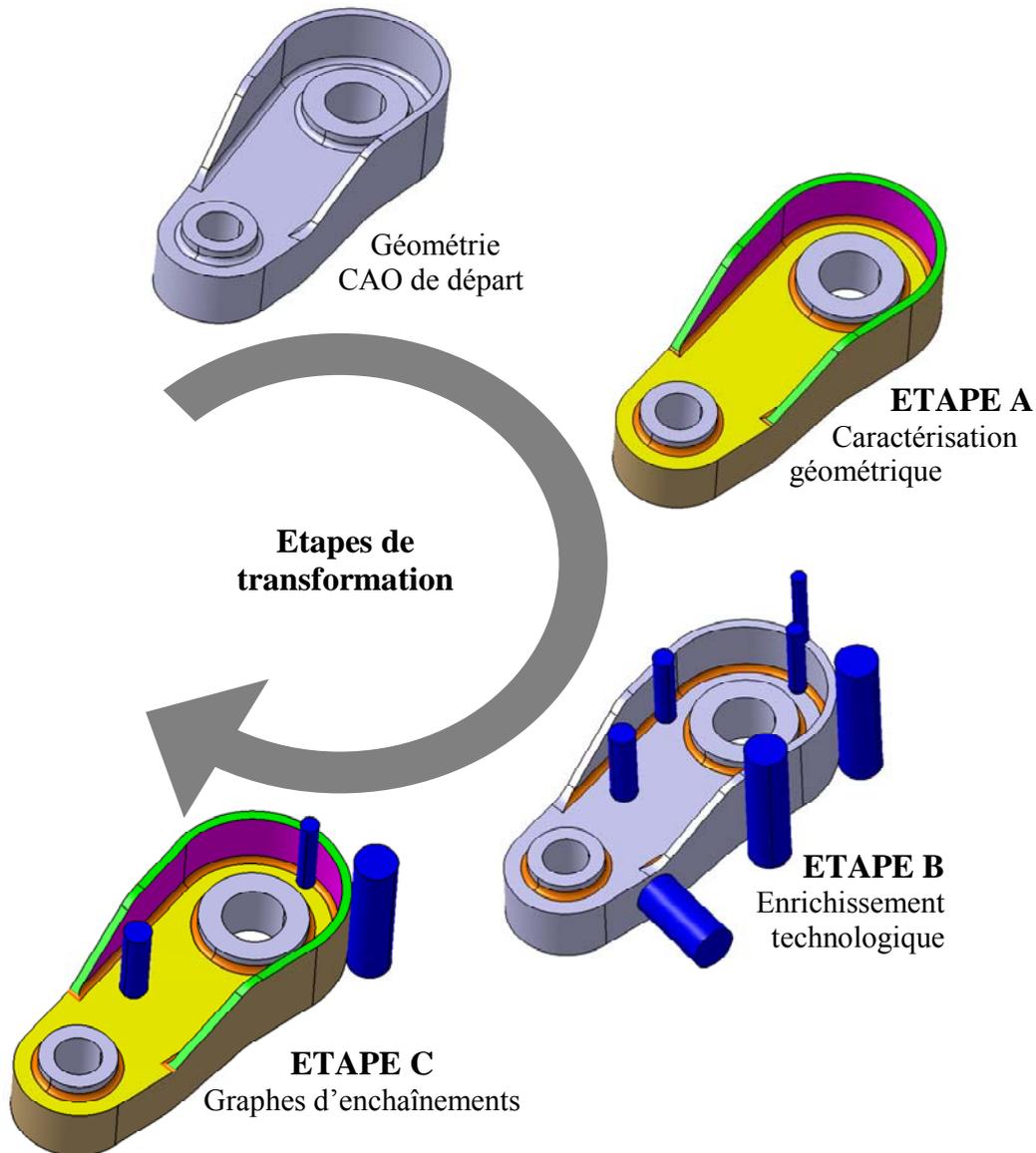


Figure 37. Etapes de transformation

La deuxième étape B exploite ces informations afin d'enrichir technologiquement les faces. Les faces sont étudiées en s'appuyant sur un ensemble de règles métier¹, qui formalise le savoir faire du préparateur. On procède au typage des faces qui correspond au calcul de leur usinabilité : UEB (usinable en bout), UEF (usinable en flanc), UQ (autre). Ce typage est complété par le calcul des masques qui excluent des faces UEB et UEF les zones non accessibles à l'outil. Les directions d'usinage calculées peuvent entraîner un usinage imparfait des voisinages de congés, les epsi-masques permettent de caractériser qualitativement les arêtes affectées. Cet enrichissement de la face nous conduit à introduire la notion d'entité d'usinage élémentaire.

¹ Ces règles métiers sont décrites dans le 'classer' rédigé par M. Jean-Marc GRILLET, ancien Directeur Générale des Opérations Industrielles chez Dassault Aviation. Le savoir faire fourni dans le document est un résumé de 20 ans d'expertise.

La troisième étape C analyse le graphe de la géométrie enrichie et détermine les faces pouvant être enchaînées simultanément, elles sont regroupées et leurs attributs sont harmonisés, elles constituent alors des entités d'usinage de plus haut niveau. Un certain nombre d'entités particulières sont caractérisés telles les entités références de posage et les entités minces. Aux entités références on associe un brut approximatif.

Ces trois étapes sont détaillées dans les parties A, B et C de ce chapitre. Il se termine par une partie D qui comporte l'étude de l'interface Préparateur/Usiquick. Cette dernière s'attache à organiser les résultats de la transformation de la pièce dans un ordre logique préparateur. Nous proposons des fiches d'identité des fonctions qu'un système automatique d'aide à la génération de gamme d'usinage doit à notre avis accomplir. L'ordre de ces fonctions résulte des attentes des préparateurs de l'usine d'Argenteuil de Dassault Aviation, il a été déterminé avec eux. Ces fonctions peuvent être généralisées à d'autres industries selon un séquençement différent.

A. Caractérisation Géométrique

Le modèle de données du transformateur d'USIQUICK se doit d'être un modèle unique et fédéré, de façon à pouvoir s'intégrer dans les différents modules du projet (Transformateur, Préparation, Génération). En effet, les modèles issus de l'activité de conception proprement dite ne contiennent pas toutes les connaissances métiers nécessaires à la génération automatique de gammes, et à la génération automatique des trajectoires. Une intégration forte ne devient possible qu'en étendant et harmonisant les modèles utilisés actuellement au sein des logiciels de CAO/FAO.

La modélisation géométrique (modèle CAO de base) n'est pas suffisante pour permettre cette intégration. Plusieurs concepts et solutions ont été présentés tel le concept d'entité d'usinage. Ce dernier a été présenté chapitre 1. Nous avons noté que tel qu'il a été étudié, défini et implémenté il n'a pas donné de résultats concluants sur des pièces non prismatiques et/ou 5 axes. Un des objectifs de ce travail est de faire évoluer ce concept pour l'adapter au contexte de la définition et de la réalisation des pièces d'aviation.

Le modèle initial est un modèle par frontières (B-Rep), ce type de modèle est plutôt bien adapté à l'activité de fabrication. La modélisation B-Rep représente un corps solide en divisant convenablement son enveloppe en un ensemble de faces. En général la division est réalisée de telle sorte que la forme de chaque face ait une représentation mathématique simple et compacte. Par exemple, jusqu'à ce qu'elle s'appuie sur un plan, sur une quadrique, sur un tore ou sur une surface paramétrique. Les courbes limites de la face sont divisées en arêtes. Comme pour les faces, les arêtes sont choisies de telle sorte que chacune d'entre elles ait une représentation adaptée, paramétrique par exemple. Le morceau de courbe qui constitue l'arête est délimité par 2 sommets (Figure 38). La structure de données doit mémoriser ces éléments. Habituellement ceci est réalisé dans une structure de données hiérarchisée où aux faces sont associées leurs arêtes frontières et à celles-ci leurs sommets extrémités. En plus de ces types d'objets de base et des relations qui les lient, d'autres informations géométriques comme les équations des courbes et des surfaces, ainsi que les coordonnées des sommets doivent être présentes dans le modèle. Il est classique de regrouper toutes les informations concernant la forme des éléments géométriques sous le terme de géométrie, et toutes les informations associées aux relations existant entre ces éléments sous le terme de topologie.

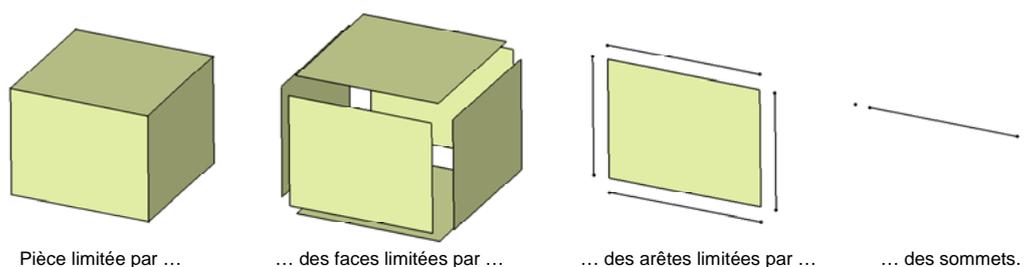


Figure 38. Modélisation B-Rep

Au départ, notre modèle géométrique est donc constitué des éléments corps, face, arête et point (Figure 39).

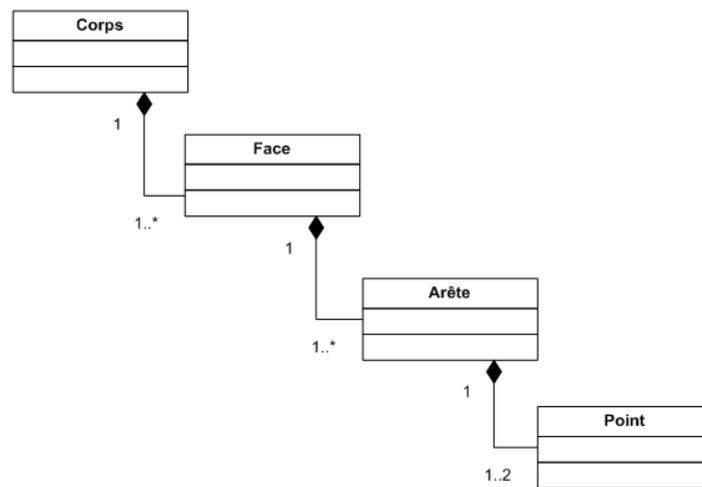


Figure 39. Modèle de départ

La caractérisation du modèle géométrique vise à déterminer une série d'informations géométriques utiles aux fonctions d'aide à la génération de gamme d'usinage. Ne présentant pas de difficulté quant à leur calcul, ces informations sont présentées sans explications sur leur méthode d'obtention sauf pour certains cas « difficiles » où le calcul est détaillé. Par contre, les différentes valeurs potentielles et leurs sens métier, quand ils existent, seront explicités.

Cette partie se divise en quatre sous parties : enrichissement de l'objet corps, de l'objet face, de l'objet arête et de l'objet point.

1. Enrichissement de l'objet corps

L'objet corps supporte différentes informations générales relatives à la pièce P . Il est enrichi avec les attributs suivants:

- (a) **Volume** V_p : volume de la pièce P .
- (b) **Aire totale** A_p : somme des aires de toutes les faces F participantes à P .
- (c) **Nombre de faces** n_F : nombre des faces F participantes à P .
- (d) **Aire moyenne** A_m : aire moyenne $A_m = \frac{A_p}{n_F}$. Elle servira à déterminer la taille d'une face.

Par exemple si l'aire de la face F est faible par rapport à A_m , on qualifiera cette face de « petite face ».

2. Enrichissement de l'objet face

Les informations issues de cette étape d'enrichissement sont enregistrées dans l'objet face F du modèle. Certains de ces attributs sont spécifiques à des types géométriques particuliers de la surface support de la face.

Dans la suite nous présentons les attributs généraux mais aussi trois attributs d'une importance particulière : la nature d'ouverture d'une face, l'étréitesse d'une face et les faces reconnues en tant que faces de raccordements.

I. Attributs Généraux

- (a) **aire** S_F : aire de la face F .
- (b) **Périmètre** P_F : périmètre de la face F .
- (c) **Périmètre Ouvert** P_{FO} : périmètre ouvert de la face (somme des longueurs des arêtes ouvertes).
- (d) **Courbure minimale** C_{\min} **et maximale** C_{\max} : les courbures minimales et maximales de la face F .

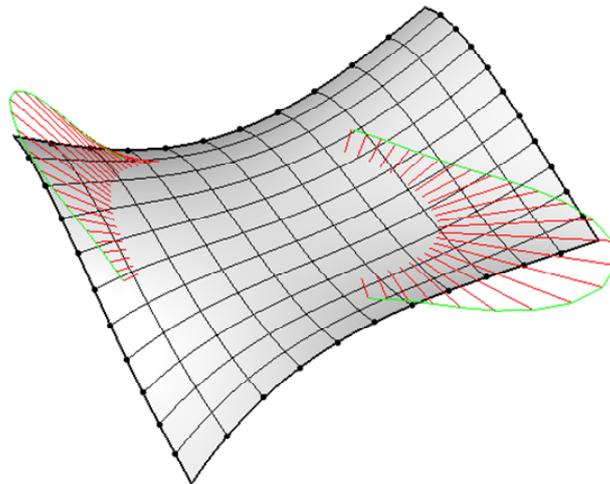


Figure 40. Vue des analyses de courbures sur deux courbes d'une face

- (e) **Type** : Nous distinguons les types particuliers de faces : planes, cylindriques, coniques, réglées et balayées par un arc de cercle. Les faces planes, cylindriques et coniques sont des faces réglées particulières. Pour une face plane nous identifions sa normale, pour une face cylindrique son axe et son rayon et pour une face conique son axe et son angle. Pour les faces réglées générales nous vérifions si elles sont générées selon une direction constante. Et, finalement, nous calculons le rayon des faces balayées.

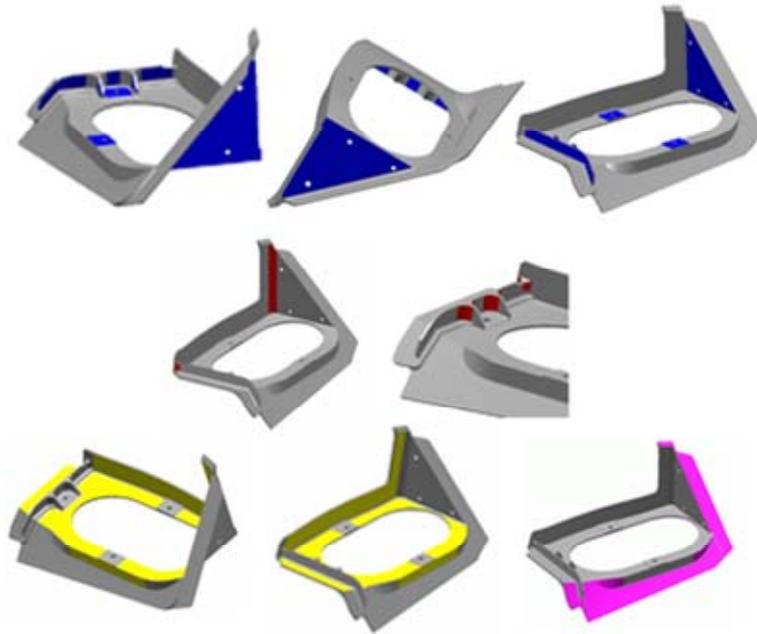


Figure 41. Distinction entre les différents types des faces d'une pièce : Les faces planes en bleu, les faces cylindriques en rouge, les faces réglées en jaune et celles quelconques en mauve.

II. Nature de la face

On considère trois natures de faces : fermées Nat_F , ouvertes Nat_O , et semi-ouvertes Nat_{SO} . Cette information sur la nature des faces est importante car elle caractérise en partie la difficulté d'accès à la face. Aussi, cette indication est utile pour les différents calculs d'usinabilité à entreprendre sur une face, i.e. une face de nature Nat_F ne sera jamais testée pour l'usinage en flanc.

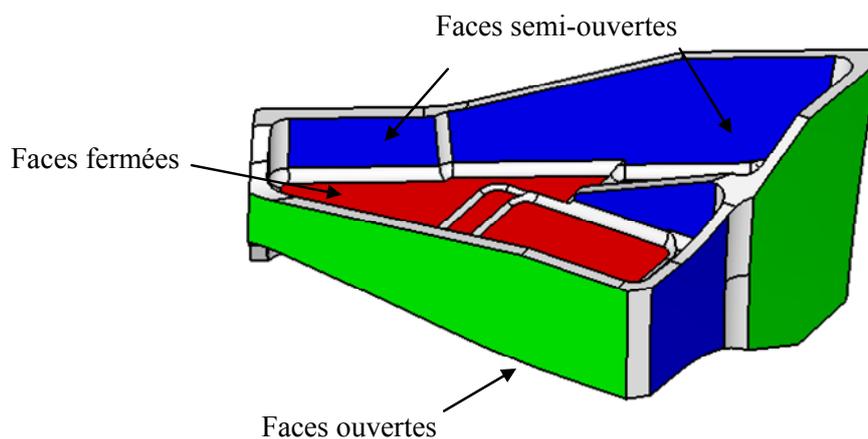


Figure 42. Typologie des différentes natures des faces

III. Étroitesse d'une face

Dans cette étape on recherche si une face participe à un élément étroit, c'est-à-dire de faible épaisseur. Ce calcul d'étroitesse indique l'existence d'un élément mince qui peut correspondre à

un fond mince où à un haut d'aile. La définition des fonds minces et des hauts d'ailes est donnée dans la section C de ce chapitre.

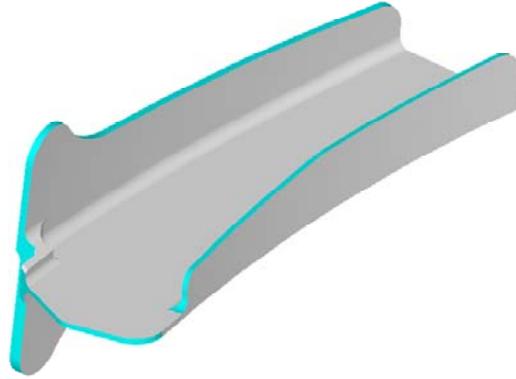


Figure 43. Exemple d'éléments étroits

Une forme géométrique est dite étroite lorsque sa longueur est très largement supérieur à sa largeur.

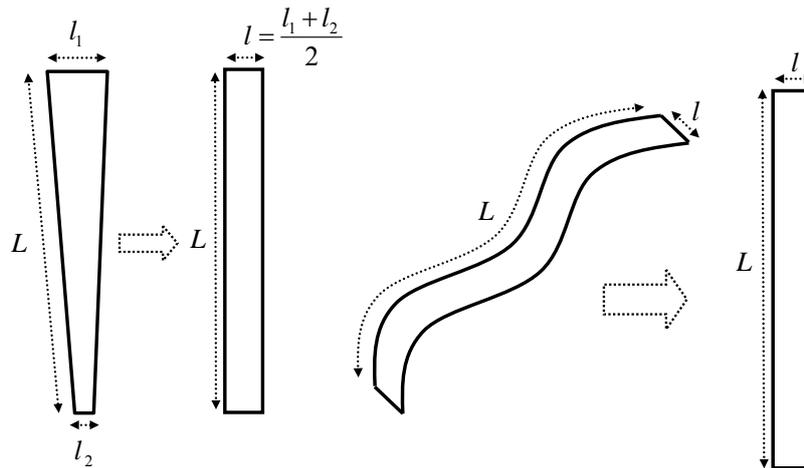


Figure 44. Le rectangle équivalent d'un élément étroit

Le critère le plus « évident » pour caractériser ce type de face est celui qui consiste à comparer l'aire de la face avec son périmètre. Plus une face est longue et étroite, plus la longueur du rectangle équivalent (Figure 44) est grande par rapport à sa largeur. On peut estimer le rapport de sa longueur (L) sur la largeur (l) en fonction de son Aire (A) et de son périmètre (P).

$$P = 2(L + l) \Rightarrow P^2 = 4(L + l)^2 \Rightarrow \frac{P^2}{4} = L^2 + 2Ll + l^2$$

Comme l est négligeable (étant assimilée à un élément étroit), $l^2 \approx 0$ l'équation devient :

$$\frac{P^2}{4} = L^2 + 2Ll$$

En divisant par A et en remplaçant A par Ll :

$$\frac{P^2}{4A} = \frac{L^2 + 2Ll}{A} = \frac{L^2 + 2Ll}{Ll} = \frac{L^2}{Ll} + \frac{2Ll}{Ll} = \frac{L}{l} + 2$$

D'où on déduit le rapport $\frac{L}{l}$ par:

$$\frac{L}{l} = \frac{P^2}{4A} - 2$$

Ce rapport caractérise donc l'étroitesse de la face, plus sa valeur est grande plus la face s'éloigne de la forme carrée pour être de plus en plus étroite.

Dans la suite il est intéressant de définir la valeur limite qui détermine si une face est étroite ou non. Pour pouvoir identifier cette valeur, nous avons mené plusieurs tests sur des pièces d'étude. Nous avons noté les remarques suivantes :

- La valeur limite dépend de l'écart entre l'aire de la face d'étude et de l'aire moyenne A_m ,
- La valeur limite croît exponentiellement en fonction de cet écart,
- La valeur limite décroît en fonction de l'aire totale A_T de la pièce,
- La valeur limite 5 convient aux petites faces.

Ainsi nous définissons une première valeur limites pour les petites faces :

$$\frac{L}{l} \geq 5 \quad \text{si} \quad A < A_m$$

Pour les autres faces, la formule est :

$$\frac{L}{l} \geq 5 * e^{100 \left(\frac{A - A_m}{A_T} \right)} \quad \text{si} \quad A \geq A_m$$

Afin d'éliminer de l'étude les faces qui ne participent pas à une extrémité d'élancement. Seules les faces où la somme des longueurs des arêtes ouvertes ($lg O$) dépasse les 75% de leurs périmètres totaux seront étudiées. Cette condition élimine les faces étroites qui ne participent pas à une extrémité d'élancement.

$$lg O \geq 0.75 \times P$$

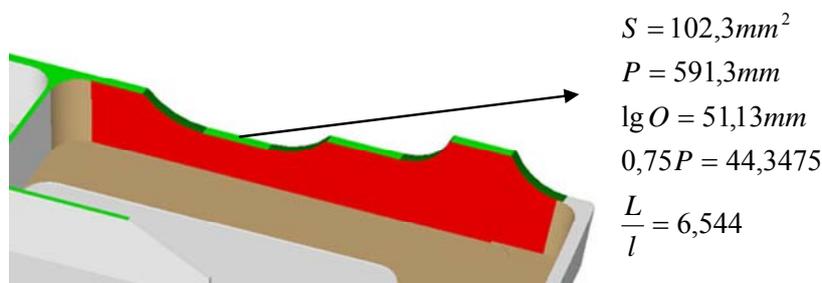


Figure 45. Exemple d'une face étroite

IV. Faces de raccordements

Dans cette étape on recherche si une face constitue une face de raccordement. Ces dernières ne sont pas fonctionnelles. Sur les pièces aéronautiques, les raccordements ont cependant une grande importance, puisqu'ils permettent de limiter les risques de fissures et de concentration de contraintes. Au niveau algorithmique, la reconnaissance de ces faces est primordiale. Elles sont utiles pour plusieurs fonctionnalités : Estimation des directions d'usinage, calcul des rayons de coins des outils capables, extraction des enchaînements ...

La figure ci-dessous présente ce qu'est une face de raccordement. Ces faces ne possèdent pas un mode d'usinage particulier, mais sont généralement usinées lors de l'usinage des faces voisines.

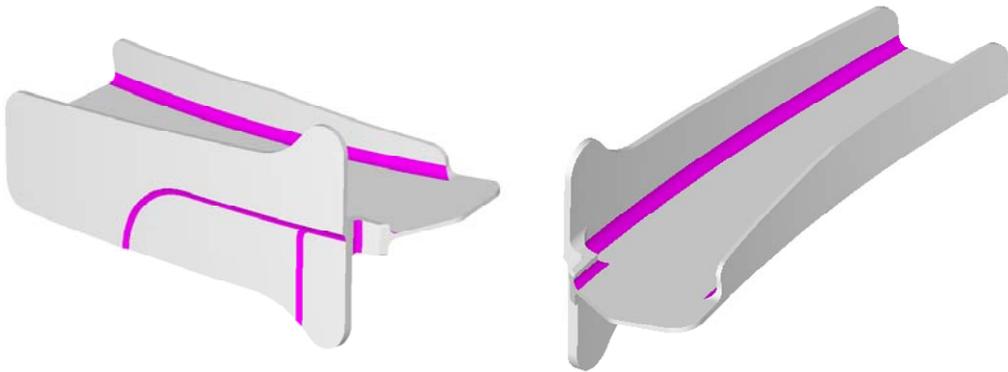


Figure 46. Exemple de faces de raccordements

La reconnaissance d'une face de raccordement passe par trois étapes essentielles : reconnaissance géométrique, recherche des caractéristiques dans les catalogues du B.E. et étude de la liaison avec son entourage.

Concernant le premier attribut, les faces de raccordement sont généralement cylindriques, balayées, sphériques ou de géométrie quelconque. Ayant identifié la géométrie de la face, on compare les caractéristiques de l'élément avec ceux du bureau d'étude de l'industrie concernée. Chez Dassault Aviation, les cylindres de rayon inférieur à 4mm ainsi que les surfaces balayées de rayon inférieur à 6mm sont considérées comme étant potentiellement des raccordements. Au final, il faudra vérifier que la face est en liaison fermée avec celles qui l'entourent. L'existence de ce type de liaison nous assure que la face n'est pas un congé ouvert (un raccordement ouvert et libre).

3. Enrichissement de l'objet arête

Les informations issues de cette étape d'enrichissement sont enregistrées dans l'objet arête A du modèle. On enrichit A par les attributs suivants tout en accordant une attention particulière à l'attribut vivacité.

I. Attributs Généraux

- (a) **Longueur l : longueur de l'arête A** . Cet attribut est d'utilité sur l'importance de l'arête et de sa prise en compte aux niveaux de l'étude des graphes d'enchaînements.
- (b) **Courbure C_A** : rayon de courbure extérieure matière, sert à l'étude des outils capables.
- (c) **Les angles d'engagement α_{EA} et de dégagement α_{DA} de l'arête** : ces angles sont particulièrement intéressants pour l'étude des directions d'usinage résultantes des arêtes les plus contraignantes. Ils indiquent la possibilité que l'outil puisse aborder la face dans le prolongement de sa surface support.

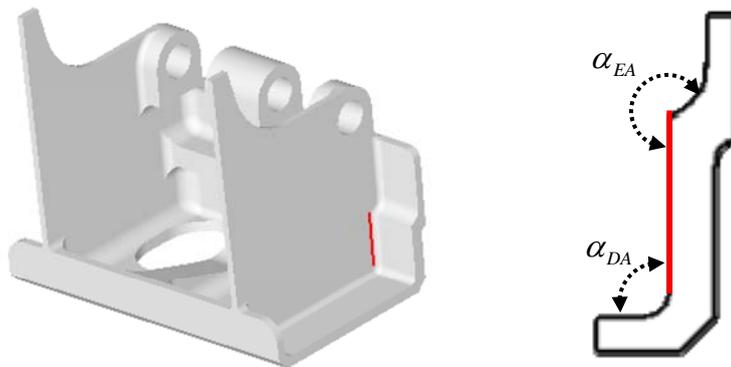


Figure 47. Angle d'engagement et de dégagement

- (d) **Faces Adjacentes Fa et Fb** : une arête est limitée par deux faces. Cette fonction donne accès aux faces adjacentes d'une arête.
- (e) **Types** : nous distinguons les types particuliers des arêtes droites et circulaires. Pour les arêtes droites on identifie la direction et pour les arêtes circulaires on identifie le centre ainsi que le rayon du cercle support.

II. La vivacité d'une arête

La vivacité d'une arête regroupe deux éléments caractéristiques pour la compréhension de la pièce : La continuité par le biais de l'arête (Tangence) et la nature de la liaison entre les deux faces au voisinage de l'arête (ouverture). C'est un critère géométrique qui évolue en fonction de l'angle que font les deux faces connectées à l'arête. En couplant la tangence et l'ouverture, nous obtenons 6 catégories différentes de vivacité (Figure 46):

Ouverte (V_O) : l'angle entre les deux faces est supérieur ou égal à 180° .

Fermée (V_F) : l'angle entre les deux faces est inférieur à 180° .

Prolongement (V_p) : l'angle entre les deux faces est égal à 180° et les deux faces sont planes, cette vivacité entraîne l'étude des deux faces ensemble.

Tangente – Ouverte (V_{TO}) : l'angle entre les deux faces est égal à 180° et au moins une face est convexe à proximité de l'arête, la tangence signifie une possibilité d'enchaîner l'usinage des deux faces.

Tangente – Fermée (V_{TF}) : l'angle entre les deux faces est égal à 180° et au moins une face est concave à proximité de l'arête, la tangence signifie une possibilité d'enchaîner l'usinage (suivant l'étude de la nature de la face adjacente).

Inflexion (V_I) : l'angle entre les deux faces est égal à 180° , une face est convexe et l'autre concave.

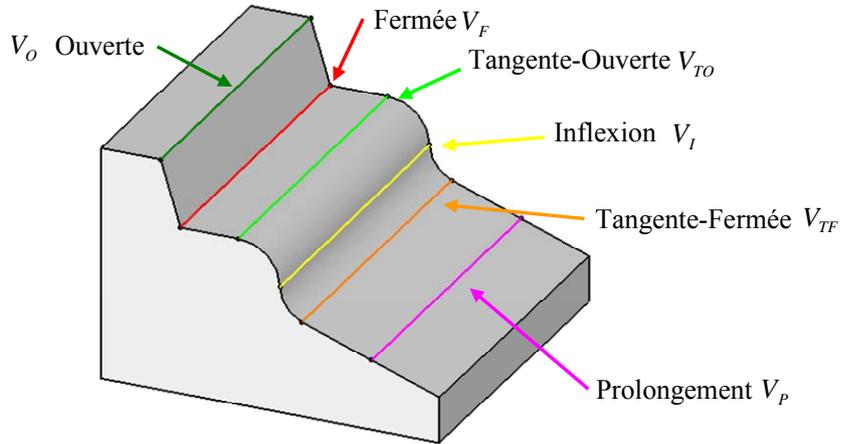


Figure 48. Typologie des vicinités

4. Enrichissement de l'objet point

Les informations issues de cette étape d'enrichissement sont enregistrées dans l'objet point P du modèle. On enrichit l'objet P par un seul élément qui est la transition.

La transition T_p d'un point P sépare les points en trois types : ouvert (OO), fermé (FF) ou transition effective (FO/OF). L'identification de la transition se calcule à partir de la valeur de la vicinité des arêtes limitant le point. Ainsi, un point ouvert OO se trouve entre deux arêtes ouvertes. Un point fermé FF se trouve entre deux arêtes fermées. Finalement, un point de transition effective OF ou FO est limité d'une part par une arête fermée et de l'autre par une ouverte (ou vice-versa). Ces derniers points vont souvent constituer une limite à ne pas dépasser avec l'axe de l'outil.

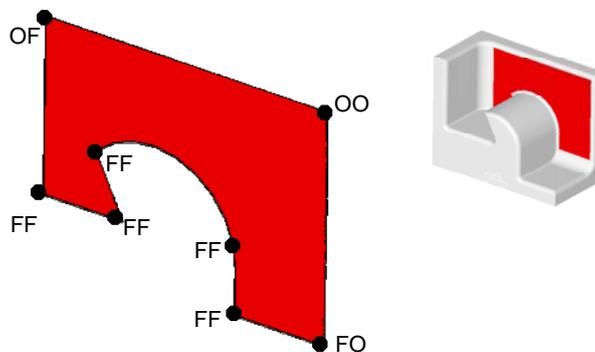


Figure 49. Typologie des transitions

5. Conclusion et extension du modèle géométrique

Cette première étape de caractérisation géométrique enrichit le modèle B-Rep de la pièce en vue de réaliser les calculs technologiques élémentaires dans l'étape suivante. Ces attributs conditionnent les résultats et les choix à déterminer ultérieurement. Les éléments (corps, face, arête, point) sont dotés de différents attributs. Ces derniers permettent de séparer les éléments en plusieurs groupes. Chaque groupe induit un traitement différent. La prise en compte de ces attributs aboutit au modèle géométrique B-Rep enrichi ci-dessous. Cet enrichissement comporte également une fonction de reconnaissance géométrique des faces. Elle a pour but d'assister le préparateur dans son travail de compréhension de pièce.

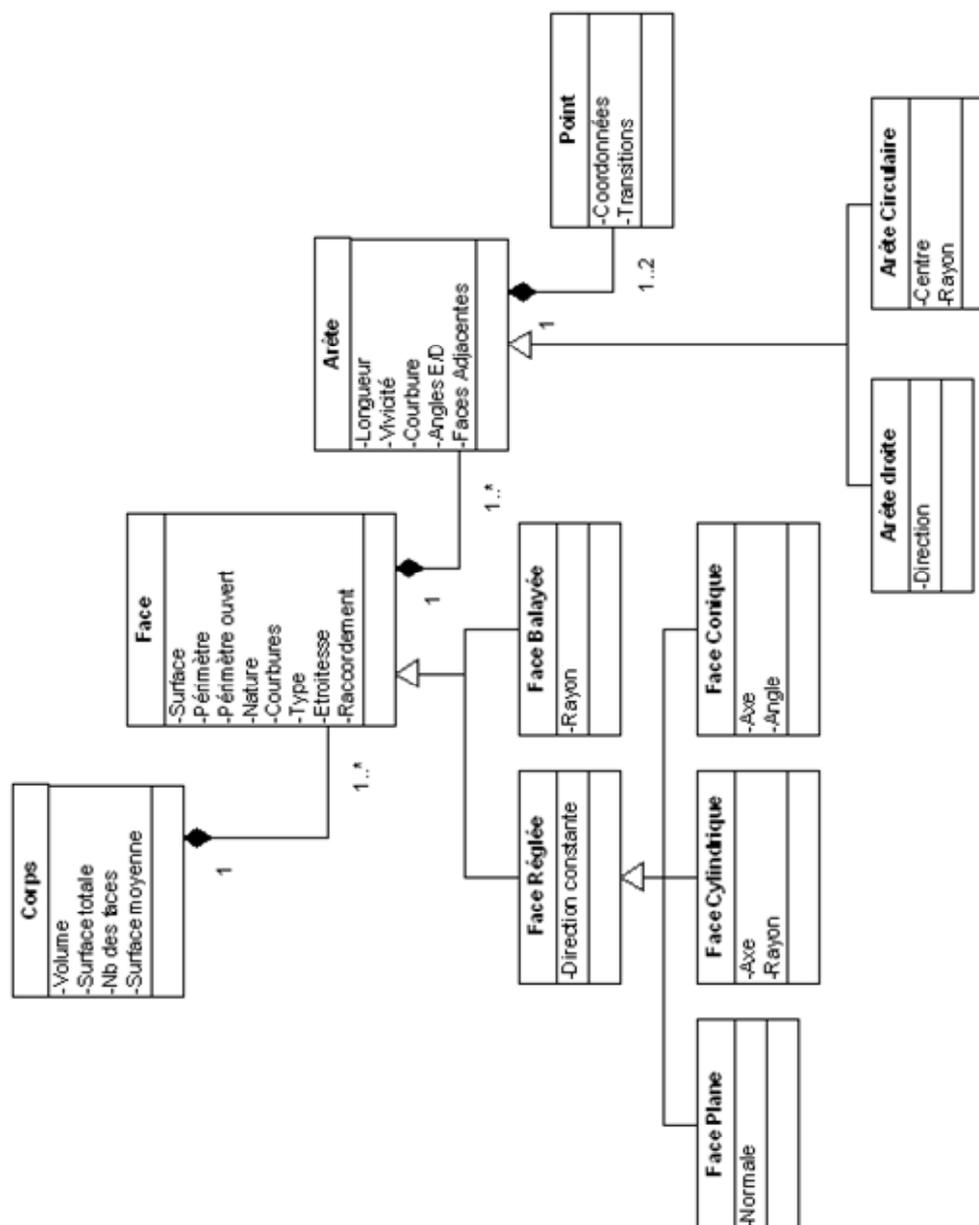


Figure 50. Modèle géométrique enrichi

B. Enrichissement Technologique Élémentaire

Cette deuxième étape vise à enrichir les faces de la pièce par des informations technologiques. Ces dernières sont destinées à être utilisées telles quelles par l'opérateur, mais aussi pour le calcul du graphe d'enchaînement et l'identification des entités d'usinage. Ces attributs d'enrichissement sont portés par la face, d'où la notion d'enrichissement technologique élémentaire, ils ne sont donc valables que pour la face. Ces faces enrichies sont très proches de la notion d'entité d'usinage élémentaire (EUE) définie par [CAP 05] :

Une entité d'usinage élémentaire **est composée d'une ou de plusieurs faces élémentaires** dont les frontières sont figées. Elle est associée à au moins un processus d'usinage de finition, identifié et validé, et indépendant des autres processus.

Cette définition, dégagée au sein du projet USIQUICK, fait porter le sens métier par une ou plusieurs faces. Pour notre part, nous modifions légèrement cette notion d'entité d'usinage élémentaire. Pour nous une entité d'usinage élémentaire ne comporte qu'une et une seule face élémentaire (et non pas plusieurs faces).

La nouvelle définition est cohérente avec l'approche opérateur, développée ci-après, qui considère la pièce face par face dans un premier temps, avant de regrouper certaines faces afin de les considérer comme un tout.

Une entité d'usinage élémentaire **est composée d'une et une seule face élémentaire** dont les frontières sont figées. Elle est associée à au moins un processus d'usinage de finition, identifié et validé, et indépendant des autres processus.

L'enrichissement technologique des faces pour l'obtention des EUE détermine les processus d'usinage de finitions potentielles (Usinage en bout, Usinage en flanc, Usinage quelconque). L'identification des directions d'usinage précède l'analyse d'usinabilité afin de limiter l'ensemble des directions d'usinage à étudier. Le choix des outils capables et du typage de la face par un mode d'usinage préférentiel participe à l'enrichissement et l'obtention des entités d'usinage élémentaires.

Les caractéristiques des EUE sont détaillées suivant un ordre chronologique de traitement. L'ordre dans lequel ces caractéristiques sont affichées à l'opérateur est différent de l'ordre de traitement et est présenté dans la partie D de ce chapitre. Après avoir présenté les 4 caractéristiques des EUE (Accès d'usinage, Usinabilité, Typage et Outils capables) nous proposons le modèle objet des EUE.

1. Accès d'usinage [HAR 06a]

Nous appelons *accès d'usinage* l'ensemble des directions à l'usinage d'une face spécifique. Ces directions d'usinage correspondent aux différentes orientations de l'axe outil assurant le balayage complet ou partiel de la face pour un mode d'usinage donné. Ces directions dépendent fortement du type géométrique de la face couplé avec le mode d'usinage appliqué. Les accès d'usinage résultent de l'étude intrinsèque de la face et de son voisinage 2D et 3D.

Les accès d'usinage se décomposent en trois familles différentes :

1 - Direction Simple d

Cet accès d'usinage concerne les faces F (ou une partie F) qui seront usinées selon une direction constante d de l'outil, notamment :

- l'usinage en bout des faces planes,
- l'usinage en flanc des faces cylindriques,
- l'usinage en flanc des faces réglées à règles constantes,
- l'usinage axial des perçages,
- l'usinage en flanc des faces planes à proximité des arêtes linéaires.

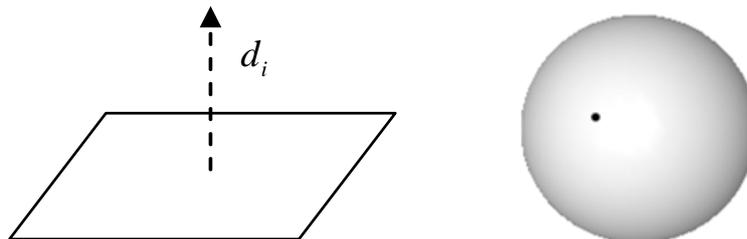


Figure 51. Direction simple et sa représentation sur la sphère d'accessibilité

2 - Cône de directions D

Cet accès d'usinage D concerne les faces F (ou une partie F) qui seront usinées selon une succession continue $[d_1, d_2, d_3 \dots d_n]$ de directions d'usinage, notamment :

- l'usinage en flanc des faces planes à proximité des arêtes non linéaires,
- l'usinage en flanc des faces réglées.

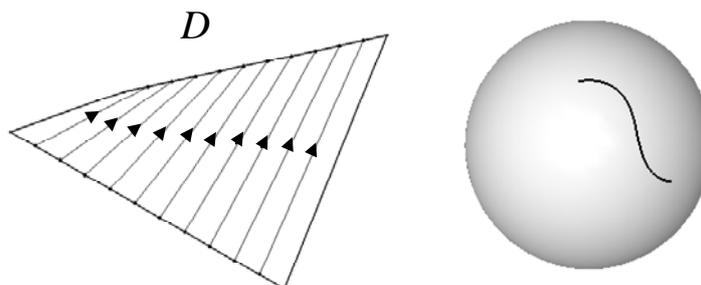


Figure 52. Cône de directions et sa représentation sur la sphère d'accessibilité

3 - Set de directions d'usinage Δ

Cet accès d'usinage concerne les faces F qui seront usinées selon un ensemble discret Δ de directions d'usinage. Cet ensemble peut se composer d'un regroupement de directions simples d et de cônes de directions D . Le cas le plus fréquent d'utilisation de cet accès d'usinage est l'usinage en flanc de faces planes.

$$\Delta_1 = \{d_1, d_2, d_3 \dots d_n\} \cup \{D_1, D_2, D_3 \dots D_m\}$$

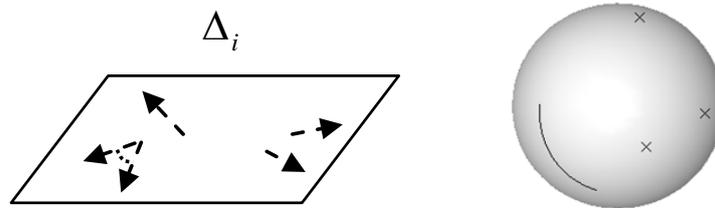


Figure 53. Set de direction d'usinage et sa représentation sur la sphère d'accessibilité

Nous détaillons dans la suite les règles métiers et les algorithmes d'obtention des différents accès d'usinage. Les différents cas couplent le type de la face à usiner et son mode d'usinage. Deux modes d'usinage sont étudiés : L'usinage en bout et l'usinage en flanc. Le résultat correspond à une des trois familles d'accès d'usinage présentées ci-dessus.

Ces accès d'usinage permettent d'usiner la face « au mieux » selon les règles métiers opérateur. L'étude de validité réelle de ces accès se fait par l'étude de l'usinabilité.

Nous distinguons la typologie suivante des accès d'usinage :

I. CAS 1 : Détermination des accès d'usinage des faces planes selon le mode usinage en bout (UEB)

Etant donné une face F plane, la direction d pour l'usinage de F en mode UEB est la direction de la normale N à F (Figure 54).

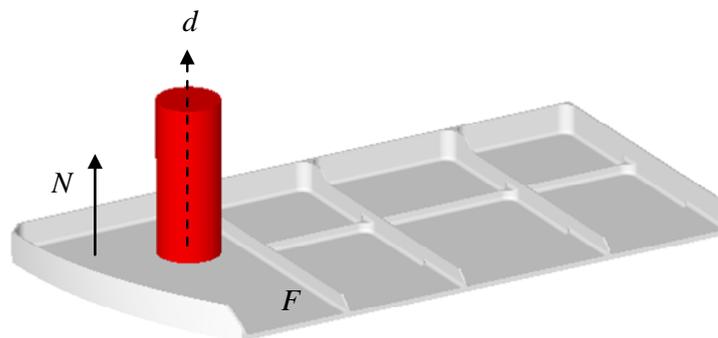


Figure 54. Direction simple d'usinage d'une face plane en bout

II. CAS 2 : Détermination des accès d'usinage des faces planes selon le mode usinage en flanc

A priori, les directions d'usinage pour usiner en flanc une face plane F peuvent être choisies arbitrairement si on ne tient pas compte du voisinage de F . Si on prend en compte ce dernier, il reste un grand nombre de directions possibles. Pour les minimiser nous proposons d'identifier les zones de F contraignantes $Z_1, Z_2, \dots, Z_i \dots$ et de déterminer les directions d'usinage de F à partir des directions 'obligatoires' à l'usinage des zones Z_i .

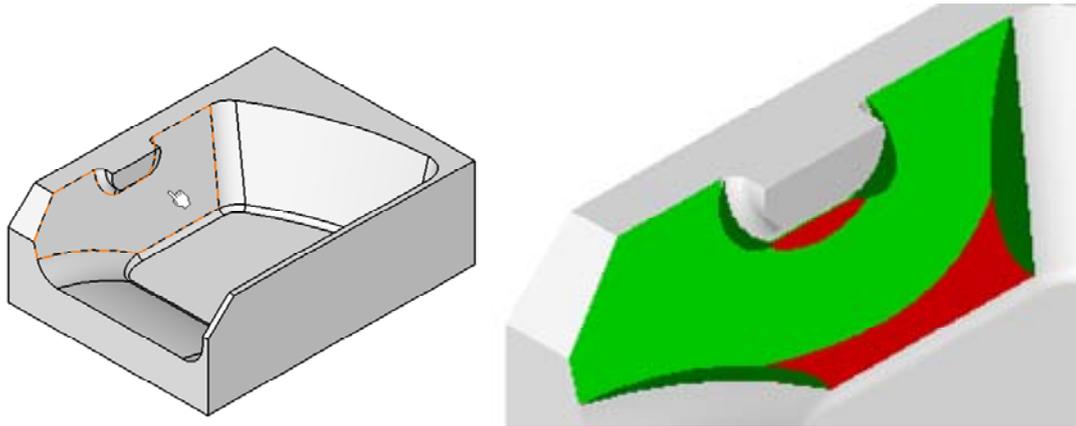


Figure 55. Zones contraignantes.

Ces zones Z_i sont en général situées aux frontières de la face. Nous les avons classées en 3 groupes : les frontières fermées, les frontières de passage et les frontières ouvertes, elles sont présentées ci-dessous

1 - Les frontières fermées (zones rouges de la figure 55)

Ces frontières correspondent aux arêtes de vicinités fermées, délimitées par d'autres arêtes de vicinités fermées. Ces vicinités indiquent l'existence de matière au delà de l'arête.

2 - Les frontières ouvertes (zone vert clair de la figure 55)

Ces frontières correspondent aux arêtes de vicinités ouvertes. Ces vicinités indiquent l'existence du vide au delà de l'arête.

3 - Les frontières de passage (zone vert foncé de la figure 55)

Ces frontières correspondent aux arêtes de vicinités fermées, délimitées par au moins une arête de vicinité ouverte. Ces frontières indiquent l'existence d'une zone de passage entre les zones fermées et ouverte. Les arêtes sont alors les frontières des 'fenêtres' d'accessibilité à la face.

Les zones contraignantes sont les frontières de passage et les frontières fermées. L'étude de ces zones permet de déterminer les directions d'usinage en flanc. Cependant, certaines configurations de faces constituent des cas particuliers et nécessitent un traitement spécifique. Par exemple les faces ne possédant pas de zones ouvertes (on les appelle faces fermées) ne sont pas usinables en flanc, elles doivent être forcement usinées en bout ou en balayage. D'autres faces ne possèdent pas de zones fermées : les faces totalement ouvertes. Dans la suite nous présentons l'extraction de l'accès d'usinage pour le cas des faces semi-ouvertes et des faces ouvertes.

CAS 2-A : Détermination des directions d'usinage en flanc des faces planes semi-ouvertes

L'extraction de l'accès d'usinage repose sur l'étude géométrique de la face F et l'étude de son voisinage immédiat 2D (V_{2D}). L'étude géométrique donne un ensemble $\Delta(F)$ de directions potentielles. L'étude du voisinage V_{2D} classe les directions de $\Delta(F)$ suivant plusieurs priorités. Au cours de la thèse l'étude a évolué selon trois versions. Les versions 1 et 2 ne sont pas présentées ici mais elles ont fait l'objet de deux publications [HAR 06a] et [HAR 06b]. Nous présentons ici l'algorithme final actuel. Les directions se répartissent selon deux modes d'extraction : l'ensemble des directions $\Delta(F, A)$ résultantes de l'étude intrinsèque des arêtes A et l'ensemble des directions $\Delta(F, p)$ résultantes de l'étude des transitions des sommets des arêtes : les points p .

$$\Delta(F) = \left\{ \bigcup_{j=1}^n \Delta(F, A_j) \right\} \cup \left\{ \bigcup_{i=1}^m \Delta(F, p_i) \right\}$$

Suite à l'extraction de l'ensemble $\Delta(F)$ nous répartissons les directions en différentes priorités.

CAS 2-A.1 : L'ensemble $\Delta(F, A)$ des directions intrinsèques aux arêtes

Cinq critères influencent le choix des directions d'usinage. Ils s'appuient sur les considérations suivantes :

- forme de l'arête bordant une face
- vivacité
- face adjacente ...

(1) D'un point de vue « direction d'usinage » nous distinguons 2 types d'arêtes : Linéaire (*lin*) ou Autres (*aut*). Pour usiner la face F au voisinage de l'arête A les directions naturelles d'usinage sont : Normalement à l'arête (Figure 56b) ou suivant les directions tangentes (Figures 56a/56c). Dans le cas particulier des arêtes linéaires, les directions se réduisent à une seule direction.

Ce premier critère établit l'ensemble de directions $\Delta(F, A)$ de la face F relatif à l'arête A .

$$\Delta(F, A) = \{D_{T1}, D_N, D_{T2}\} \text{ (Cas général)}$$

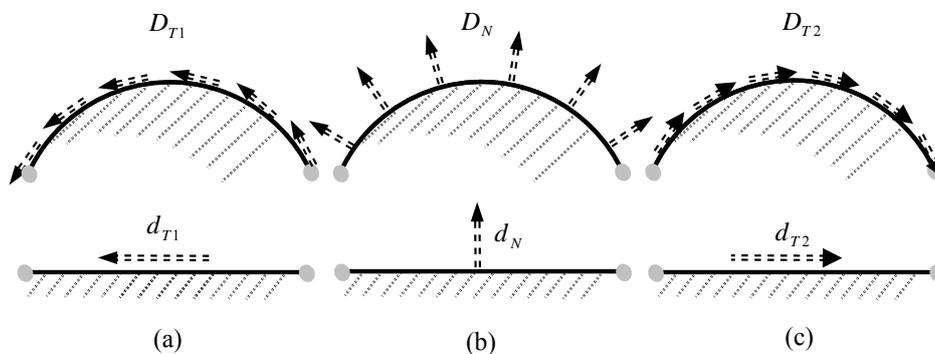


Figure 56. Directions résultantes du type géométrique de l'arête.

Les ensembles discrets (D_{T1}, D_N, D_{T2}) se réduisent aux directions simples (d_{T1}, d_N, d_{T2}) dans le cas où l'arête A est linéaire.

(2) La vivacité de l'arête A admet 2 cas possibles : Fermée/Prolongement (V_F) ou Ouverte (V_O). Les arêtes de vivacité fermées appartiennent aux zones contraignantes car elles gênent le passage de l'outil. A ces cas nous associons de fortes priorités. Les arêtes de vivacité ouvertes appartiennent aux zones non contraignantes. A ces vivacités nous proposons d'associer des priorités faibles.

Les critères suivants considèrent les vivacités des arêtes précédant (3) et suivant (4) l'arête A . Ces arêtes peuvent chacune être réparties selon 2 cas possibles: Fermée/Prolongement (V_F) ou Ouverte (V_O). Ces valeurs identifient, avec (2), le type de la frontière à laquelle appartient A . Elles influencent ainsi la séparation de priorités au sein du même ensemble $\Delta(F, A)$.

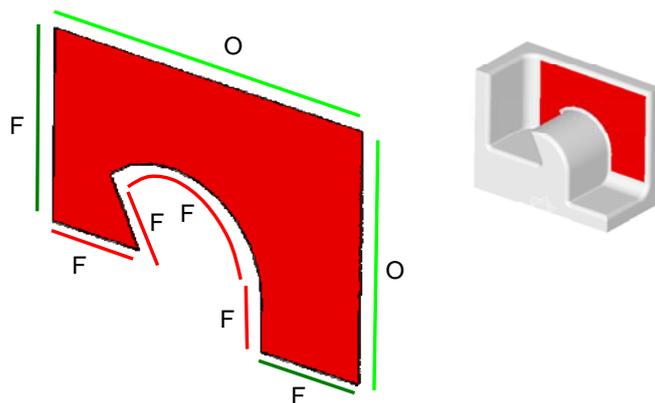


Figure 57. Vivacités et zones frontières

(5) Le type de la face adjacente Fa se sépare en deux groupes : Angle Vif ou face de Raccordement (rac) et Tangence à une face réglée (reg). Le groupe (rac) élimine l'enchaînement potentiel avec la face adjacente et privilégie ainsi l'ensemble des directions perpendiculaires par rapport aux directions tangentes. Le deuxième groupe favorise les directions tangentes pour un enchaînement «probable» entre la face F considéré et la face Fa .

La figure 58 (a) montre la direction privilégiée si la face adjacente Fa (en vert) est une face de raccordement. Cette direction est en concordance avec le savoir faire 'métier' qui propose d'usiner normalement à une face de raccordement (ou angle vif). La figure 58 (b) montre la direction privilégiée si la face adjacente Fa (en vert) est une face réglée quelconque (dans ce cas un cylindre). Cette direction est en concordance avec le savoir faire 'métier' qui propose d'usiner la face en enchaînant le cylindre et le plan.

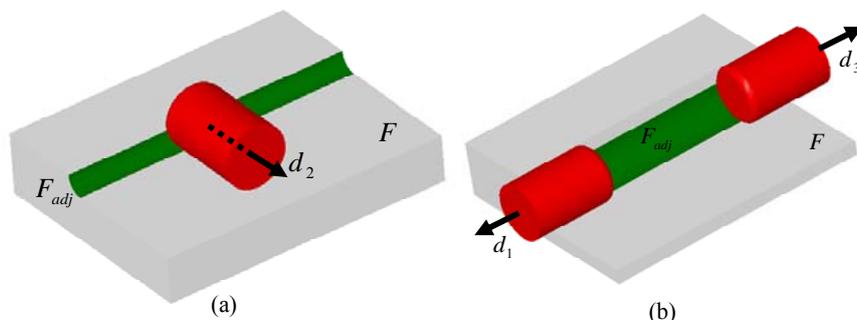


Figure 58. Influence de la face adjacente sur la priorité des directions d'usage

Les différents cas sont présentés dans le tableau suivant selon les différentes valeurs de a (vivicité de l'arête précédente), b (vivicité de l'arête), c (vivicité de l'arête suivante) et d (adjacence). L'attribut type des arêtes affecte la sortie et donc ne sera pas inclus dans les cas.

$V(A_p)$	$V(A)$	$V(A_s)$	Adj.	cas	Signification
V_O	V_O	V_O	rac	0	A appartient à une frontière ouverte et influence peu les directions d'usinage.
V_F	V_O	V_O	rac	1	
V_O	V_F	V_O	rac	2	A appartient à une frontière de passage. L'adjacence à un raccordement privilégie les directions normales.
V_F	V_F	V_O	rac	3	
V_O	V_O	V_F	rac	4	A appartient à une frontière ouverte et influence peu les directions d'usinage.
V_F	V_O	V_F	rac	5	
V_O	V_F	V_F	rac	6	A appartient à une zone contraignante. L'adjacence à un raccordement privilégie les directions normales.
V_F	V_F	V_F	rac	7	
V_O	V_O	V_O	reg	8	A appartient à une frontière ouverte et influence peu les directions d'usinage.
V_F	V_O	V_O	reg	9	
V_O	V_F	V_O	reg	10	A appartient à une frontière de passage. L'adjacence à une face réglée privilégie les directions tangentes.
V_F	V_F	V_O	reg	11	
V_O	V_O	V_F	reg	12	A appartient à une frontière ouverte et influence peu les directions d'usinage.
V_F	V_O	V_F	reg	13	
V_O	V_F	V_F	reg	14	A appartient à une zone contraignante. L'adjacence à une face réglée privilégie les directions tangentes.
V_F	V_F	V_F	reg	15	

Tableau 2. Les différents cas

Dans la suite on définit la priorité des directions résultantes en nous appuyant sur les idées suivantes :

- 1 – Les directions résultant de l'étude des zones contraignantes sont d'un niveau supérieur à celles résultant de l'étude des zones ouvertes.
- 2 – Aux directions résultant des zones contraignantes nous privilégions :
 - (a) la direction normale dans le cas où la face adjacente est une face de raccordement ou si elle présente un angle vif,
 - (b) les directions tangentes dans le cas où la face adjacente est réglée.

Nous identifions ainsi trois niveaux différents de priorités. Pour prendre en compte la contrainte (1) et faciliter la représentation des priorités respectives en fonction du cas (Tableau 2), les résultats sont regroupés sous la forme : $(\Delta, \text{Priorité})$ où Δ représente le groupe des directions (D_{T1} / D_{T2} pour les directions tangentes et D_N pour les directions normales) et Priorité représente la valeur de la priorité (1, 2 ou 3). Par exemple $(D_N, 3)$ signifie que les directions normales D_N sont de la troisième priorité.

Les priorités indiquent l'ordre que nous opterons pour l'usinage de la face F considérée. Dans la plupart des cas les priorités de valeur '1' doivent permettre l'usinage global de la face. La validation de ces directions d'usinage se fait par l'étude de l'usinage en flanc.

cas	Les priorités respectives
0	$(D_{T1},3) (D_N,3) (D_{T2},3)$
1	
2	$(D_{T1},2) (D_N,1) (D_{T2},2)$
3	
4	$(D_{T1},3) (D_N,3) (D_{T2},3)$
5	
6	$(D_{T1},2) (D_N,1) (D_{T2},2)$
7	
8	$(D_{T1},3) (D_N,3) (D_{T2},3)$
9	
10	$(D_{T1},1) (D_N,2) (D_{T2},1)$
11	
12	$(D_{T1},3) (D_N,3) (D_{T2},3)$
13	
14	$(D_{T1},1) (D_N,2) (D_{T2},1)$
15	

Tableau 3. La répartition des priorités

L'analyse du tableau 3 pour les priorités de valeur 1 s'interprète de la manière suivante :

- les directions perpendiculaires (dans la face) aux arêtes A qui appartiennent à une zone contraignante et sont adjacentes à un raccordement ont une forte priorité (priorité 1) (*elles devront donc être considérées en premier*).
- Les arêtes A qui appartiennent à une zone contraignante et sont adjacentes à une face voisine réglée ont une forte priorité (priorité 1).

CAS 2-A.2 : L'ensemble $\Delta(F, p)$ des directions résultantes de l'étude de transition des points

Un seul critère conditionne l'extraction des directions d'usinage par l'étude des points p : la valeur de l'attribut transition.

Les points p se séparent alors en trois groupes:

- Les points p_{OO} de transition OO (en vert clair).
- Les points p_{FF} de transition FF (en rouge).
- Les points p_{OF} de transition OF / FO (en vert foncé).

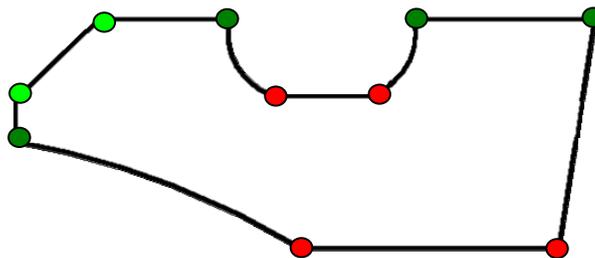


Figure 1. Les groupes des points de la face (Figure 55)

L'idée est de proposer l'ensemble $\Delta(F, p)$ des directions d'usinage capables d'atteindre les points p_{FF} les plus contraignants (les points rouges). Dans le cas où ces points sont inaccessibles avec l'ensemble des directions de $\Delta(F, A)$ résultant de l'étude des arêtes A à laquelle p appartient et qui sont de priorité 1. Nous proposons alors les directions d'usinage formées par les liaisons (p_{FF}, p_{OF}) et (p_{FF}, p_{OO}) .

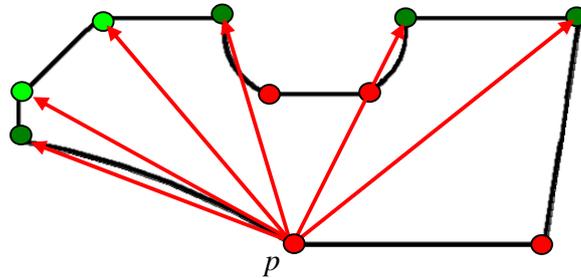


Figure 60. Directions d'usinage pour le point p

$$\Delta(F, P) = \bigcup_{\text{pour les P inaccessible selon les } \Delta(F, A) \text{ de priorité 1}} \{d(P, P_{OO}), d(P, P_{OF}), d(P, P_{FO})\}$$

ensemble des directions formées en reliant p aux autres points de F de transition OO , OF ou FO pour les points P inaccessibles selon les directions de $\Delta(F, A)$ de priorité 1

La priorité des directions résultantes de l'étude des transitions des points sera juste derrière la priorité 1 des directions résultantes de l'étude des arêtes. Ainsi nous rajoutons une priorité 1.5 dans l'échelle précédente.

Exemple de résultat de l'application de l'algorithme sur la face F (Figure 55)

Nous identifions dans un premier temps les différentes valeurs des critères géométriques portés par les arêtes et les points (Figure 61).

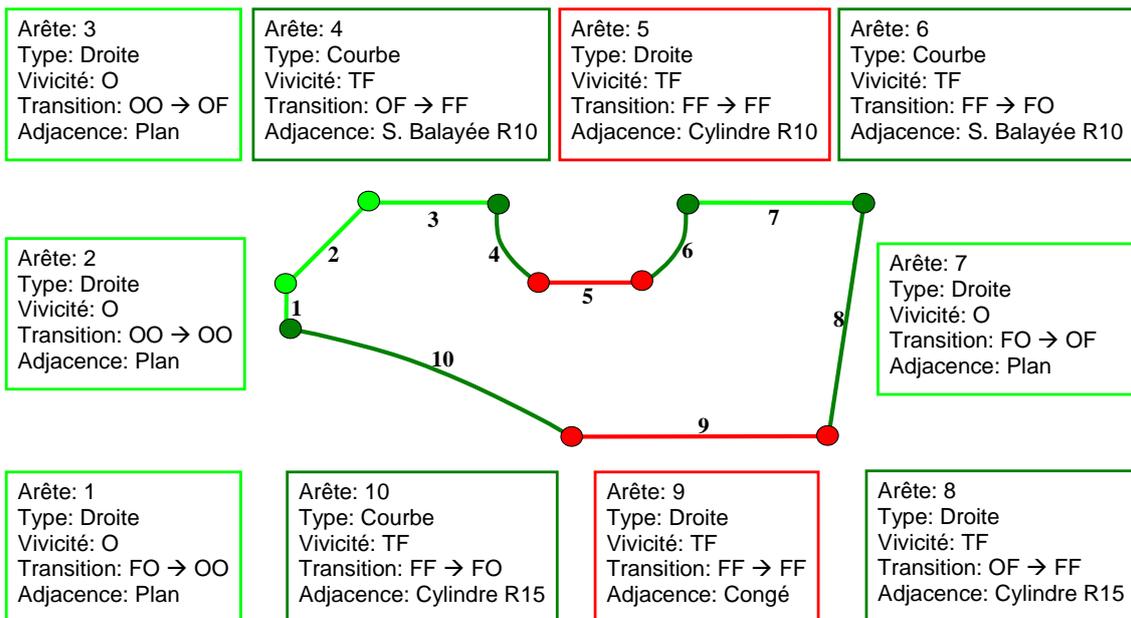


Figure 61. Caractérisation des arêtes et points de la face F

Nous calculons par la suite la valeur x du cas par arête (Figure 62).

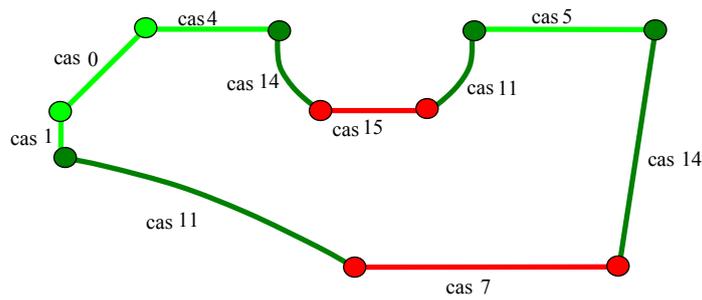


Figure 62. Identification du cas par arête

Ayant identifié les différents cas des arêtes ainsi que les transitions sur les points, nous présentons les résultats selon les différentes priorités : Priorité 1 (Figure 63), Priorité 1.5 (Figure 64), Priorité 2 / 3 (Figure 65).

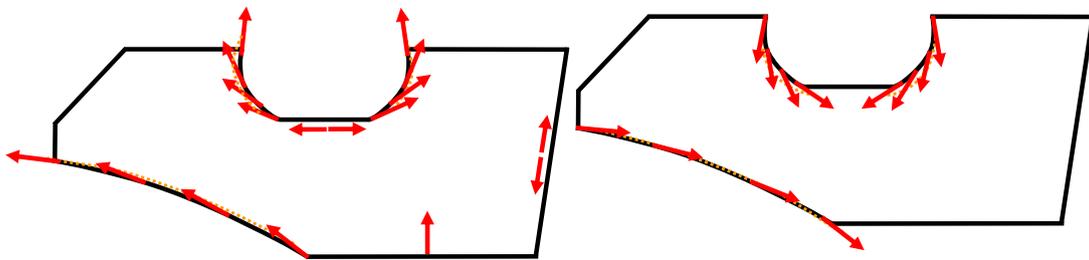


Figure 63. Directions de priorités 1

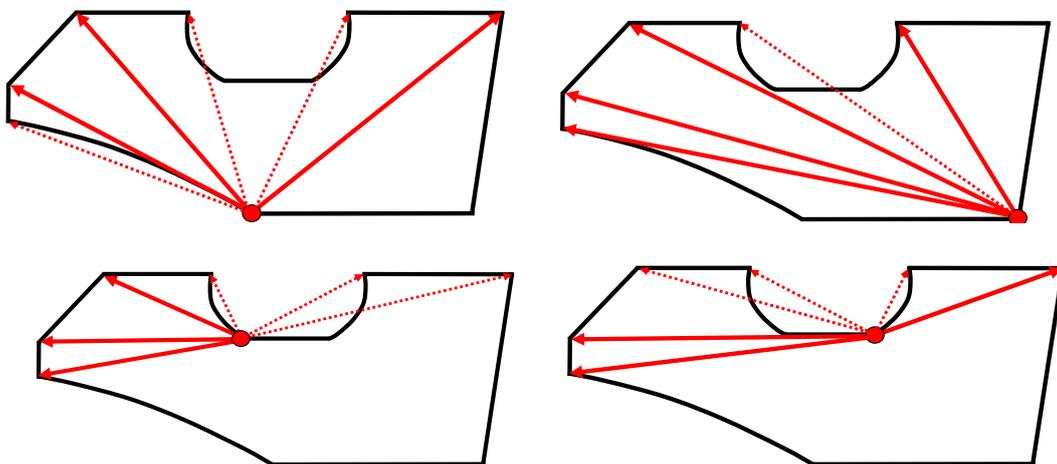


Figure 64. Directions de priorités 1.5

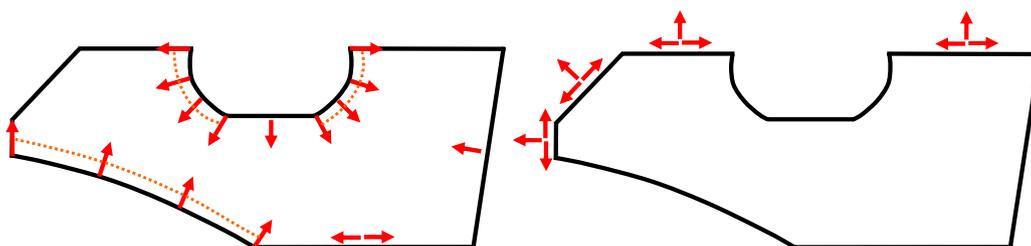


Figure 65. Directions de priorités 2 / Directions de priorités 3

CAS 2B : Détermination des accès d'usinage des faces planes ouvertes selon le mode d'usinage en flanc

Les faces planes complètement ouvertes sont généralement situées à l'extérieur de la pièce, elles peuvent constituer des extrémités d'élançement ou des faces d'appui pour les posages. Ces faces seront usinées alors selon l'un des trois procédés: chaîne de flanc externe (en Z ou 5 Axes), usinage avant ébauche des extrémités d'élançement (la plupart du temps en bout) et usinage en bout des faces de posage (avec une fraise de surfacage). Certaines 'protubérances' en fond de poche fermée comportant en partie supérieure une face plane seront usinées en bout. Comme nous étudions les directions d'usinage en flanc, on se limite au premier cas : les faces planes complètement ouvertes appartenant essentiellement à un enchaînement en flanc. Certaines de ces faces dont l'aire est grande seront alors transformées en faces réglées et découpées en plusieurs morceaux. Leur étude sera incluse dans l'analyse d'usinabilité.

L'extraction de l'accès d'usinage $\Delta(F)$ de F repose uniquement sur l'étude des arêtes, aucune étude sur les points n'est utile dans ce cas. Les critères géométriques pour cette étude sont au nombre de trois : le type de l'arête (1), la vivacité de l'arête (2) et le type de la face adjacente (3).

$$\Delta(F) = \bigcup_{j=1}^n \Delta(F, A_j)$$

Pour le type de l'arête A (1) deux cas sont possibles : Linéaire (*lin*) ou Autres (*aut*). Les règles métiers proposent deux classes de directions pour les réaliser «au mieux» suivant les directions tangentes. Deux différences à noter par rapport au cas précédent 2A (Page 64) : le type de l'arête influence la priorité donc il est inclus dans les cas étudiées (on favorise les arêtes linéaires) et les directions perpendiculaires sont éliminées. Ce premier critère établit l'ensemble de directions $\Delta(F, A)$ de la face F relatif à l'arête A .

$$\Delta(F, A) = \{D_1, D_2\} \text{ (Cas général)}$$

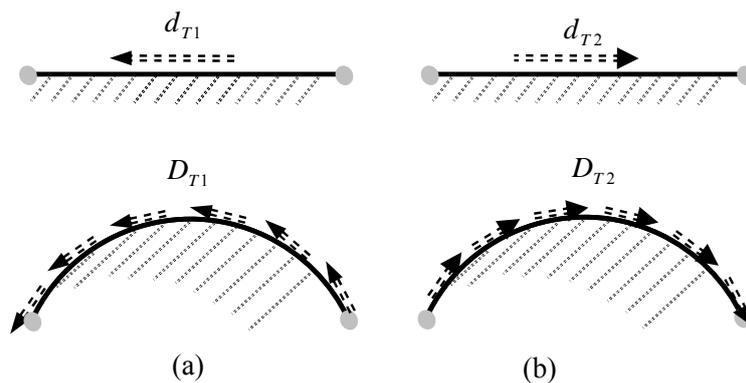


Figure 66. Directions résultantes du type géométrique de l'arête.

Les ensembles discrets (D_1, D_2) se réduisent aux directions simples (d_1, d_2) dans le cas où l'arête A est linéaire.

La vivacité de l'arête A (2) se regroupe selon 2 cas possibles : Tangente Ouverte (V_{TO}) ou Ouverte (V_O). Les arêtes tangentes participent à des enchaînements éventuels. Ainsi, elles influencent la priorité de l'accès d'usinage.

Le type de la face adjacente F_a (3) se sépare en deux groupes : Face réglée non plane (*reg*) et autres (*aut*). Le premier groupe favorise alors la direction et indique l'existence d'un enchaînement.

Les différents cas sont présentés dans le tableau suivant selon les différentes valeurs de a (type de l'arête), b (vivacité de l'arête) et c (nature de la face adjacente).

N(A)	V(A)	Adj.	cas	Signification
<i>lin</i>	V_o	<i>reg</i>	0	A n'a pas une tangence avec son entourage. La direction qu'elle proposera est non importante.
<i>aut</i>	V_o	<i>reg</i>	1	
<i>lin</i>	V_{TO}	<i>reg</i>	2	A possède une tangence avec une face réglée. Elle proposera la direction de plus haute priorité.
<i>aut</i>	V_{TO}	<i>reg</i>	3	
<i>lin</i>	V_o	<i>aut</i>	4	A n'a pas une tangence avec son entourage. La direction qu'elle proposera est non importante.
<i>aut</i>	V_o	<i>aut</i>	5	
<i>lin</i>	V_{TO}	<i>aut</i>	6	A possède une tangence mais avec une face non réglée. Elle n'influence pas les priorités.
<i>aut</i>	V_{TO}	<i>aut</i>	7	

Tableau 4. Les différents cas

Par étude des différents cas nous dégageons les remarques suivantes :

- Les arêtes linéaires imposent toujours des directions de plus haute priorité.
- Les vivacités avec tangence imposent aussi des directions de plus haute priorité, surtout si la face adjacente est une face réglée.

Le Tableau 5 montre les priorités respectives en fonction du cas et de la direction.

cas	Les priorités respectives
0, 4, 6	$(D_1,2) (D_2,2)$
1, 3, 5, 7	$(D_1,3) (D_2,3)$
2	$(D_1,1) (D_2,1)$

Tableau 5. La répartition des priorités

Ainsi nous associons à l'accès d'usinage $\Delta(F)$ de F trois priorités différentes. Il nous reste à inclure la notion de poids d'enchaînements et de référence.

Notion de poids d'enchaînements et de référence

Une face F complètement ouverte peut avoir plusieurs directions de première priorité ou ne pas avoir d'accès d'usinage. Pour choisir entre ces directions nous introduisons des notions dites : poids d'enchaînements et poids de référence. Il semble judicieux de prendre en compte la direction du posage (plan de référence) et d'attribuer aux directions d'usinage de la face qui lui sont parallèles une préférence sur les autres directions de même priorité.

Par exemple, la face F de la pièce (Figure 67) possède 4 accès d'usinage potentiel, tous de priorité 2. Cependant les accès (D_1, D_4) ont un « plus » : ils sont parallèles à la direction du

posage d_p . Ainsi, nous définissons un accès d'usinage prioritaire au sein du même groupe en utilisant la notion de poids de référence. En ce qui concerne la notion du poids d'enchaînement, elle sera explicitée en partie C de ce chapitre.

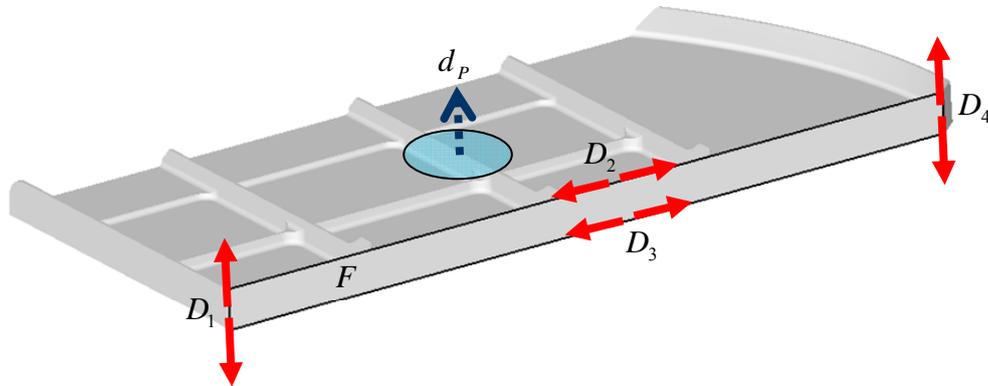


Figure 67. Exemple des notions de poids

III. CAS 3 : Détermination des directions composant l'accès d'usinage des faces cylindriques selon le mode d'usinage en flanc

L'accès d'usinage $\Delta(F)$ d'une face F cylindrique n'est autre que D_1 direction parallèle à d_c l'axe du cylindre (Figure 68).

$$\Delta(F) = \{D_1\}$$

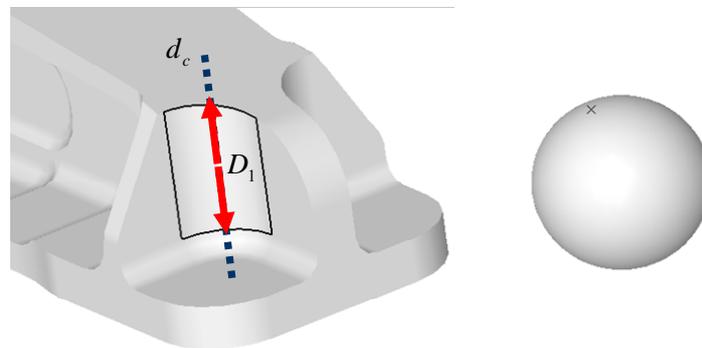


Figure 68. Accès d'usinage d'un cylindre

IV. CAS 4 : Détermination des directions composant l'accès d'usinage des faces réglées selon le mode d'usinage en flanc

Une face F réglée (quasi développable) est définie par le déplacement d'un segment (la droite support de ce segment est appelée règle) dans l'espace. L'accès d'usinage $\Delta(F)$ de F est formé par l'ensemble des directions « axe-outil » calculé en déportant les règles d'une valeur d égale au rayon outil « normalement » à la face.

L'axe de l'outil est placé suivant la droite formée par les 2 points O_1 et O_2 . Ces deux points sont obtenus en appliquant les formules suivantes :

$$O_1 = P_1 + d * \vec{N}_{F(P_1)} \quad O_2 = P_2 + d * \vec{N}_{F(P_2)}$$

Les points P_1 et P_2 correspondent aux extrémités d'une règle de la face F . Les normales $\vec{N}_{F(P_1)}$ et $\vec{N}_{F(P_2)}$ correspondent à la face F en O_1 et O_2 respectivement.

Ce positionnement est amélioré par plusieurs algorithmes présentés dans l'état de l'art.

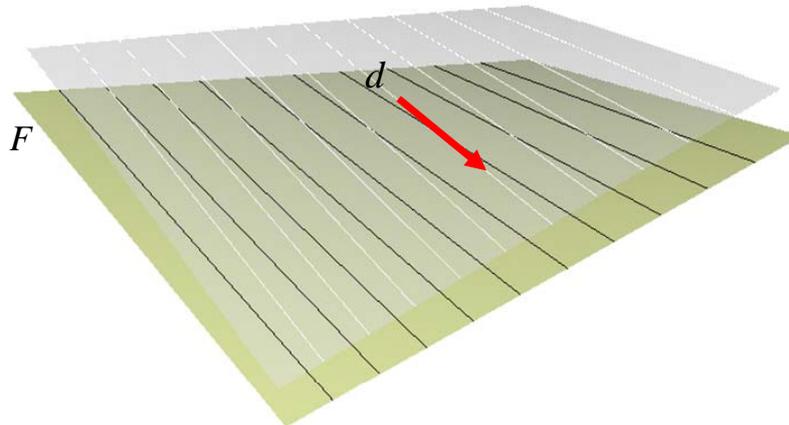


Figure 69. Accès d'usinage d'une surface réglée

2. Analyse d'usinabilité

Etudier l'usinabilité d'une face F consiste à déterminer les zones non usinables MF de F pour les directions D de l'accès d'usinage $\Delta(F)$ calculé dans l'étape précédente. L'aire de MF doit être inférieure à un seuil maximal – voire nulle – afin de valider les directions D d'étude. Si l'aire de MF dépasse le seuil fixé on doit envisager l'usinage de cette partie selon un autre mode d'usinage (ou une combinaison de plusieurs modes d'usinage). Nous venons de reformuler un peu différemment et de manière plus précise l'usinabilité présentée dans l'introduction, avant de développer le calcul de MF nous allons présenter les différents modes d'usinage potentiels et définir les notions de masques de type 1, masques de type 2 locaux, masques de type 2 et d' ϵ -masques.

I. Les différents modes d'usinage

Les différents types d'usinage sont l'usinage en bout (nommé par la suite UEB), l'usinage en flanc (UEF), l'usinage en flanc simultané (UEFS), l'usinage en bout simultané (UEBS) et l'usinage quelconque (UQ) :

L'usinage en bout (UEB) : la face usinée est obtenue en travail d'enveloppe par la denture du bout de la fraise. La direction de la fraise est normale à la face.

L'usinage en flanc (UEF) : la face usinée est obtenue en travail de forme par la denture latérale de la fraise. L'axe de la fraise est contenu dans une surface offset de la face de départ. L'offset a pour valeur le rayon de la fraise.

L'usinage simultané (US) : la face est obtenue par l'usinage simultané de 2 faces dont l'une est usinée en flanc et l'autre en bout

L'usinage quelconque (UQ) : ce mode est utilisé lorsque aucun des modes ci-dessus ne conviennent. Il comporte entre autre l'usinage par balayage ou par fraise de forme.

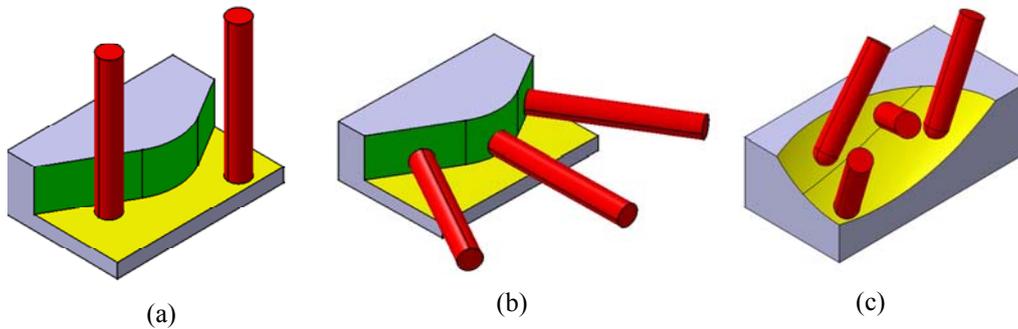


Figure 70. a - Usinage en bout (UEB) ; b - Usinage en flanc (UEF) ; c - Un exemple d'usinage quelconque (UQ)

II. Définitions utiles à l'analyse d'usinabilité

- **Masque de type 1** $Mt1(F, N)$: Etant donnée une face plane F appartenant à une pièce P , le masque de type 1 $Mt1(F, N)$ de F est la sous face MF contenue dans F qui n'est pas usinable en bout suivant la direction N , normale de F , pour des raisons d'accessibilité dues aux autres faces de P . Si toute la face est accessible selon N , $Mt1(F, N)$ est l'ensemble vide.

$$Mt1(F, N) = MF$$

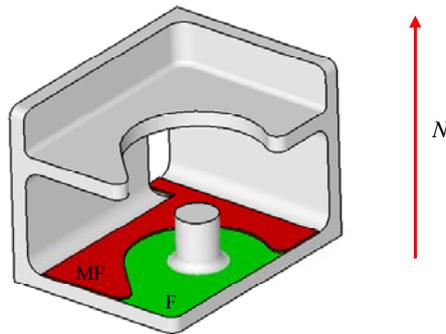


Figure 71. Masque de type 1

- **Champs d'usinage** $CU(F, d)$: Etant donnée une face F appartenant à une pièce P , le champs d'usinage $CU(F, d)$ de F est la sous face VF contenue dans F qui est accessible suivant la direction d . Si toute la face est accessible selon d , $CU(F, d)$ est la totalité de la face F .

$$CU(F, d) = VF$$

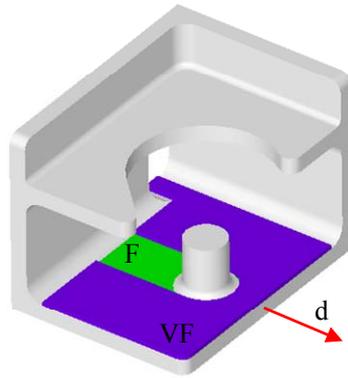


Figure 72. Champ d'usinage

- **Masque de type 2 Local $Mt2L(F, d)$** : Etant donnée une face F appartenant à une pièce P , le masque de type 2 local $Mt2L(F, d)$ de F est la sous face MF contenue dans F qui n'est pas usinable en flanc suivant la direction d pour des raisons d'accessibilité dues aux autres faces de P . Si toute la face est accessible selon d , $Mt2L(F, d)$ est l'ensemble vide.

$$Mt2L(F, d) = MF$$

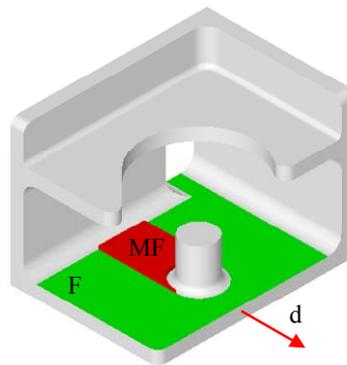


Figure 73. Masque de type 2 Local

- **Masque de type 2 Global $Mt2L(F, D)$** : Le masque de type 2 global d'une face F est l'intersection des masques de type 2 locaux $Mt2L(F, d)$ calculés pour l'ensemble des directions $D = \{d_0, d_1, \dots, d_n\}$. On a:

$$Mt2G(F, D) = \bigcap_{i=1}^n Mt2L(F, d_i)$$

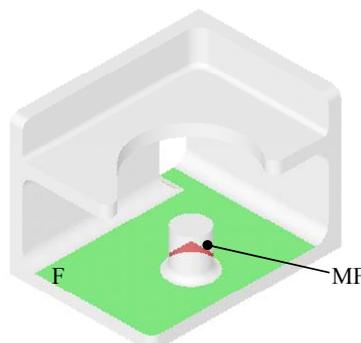


Figure 74. Masque de type 2 Global

- **Epsi-Masque** $\varepsilon Mt2(F, A, d)$: Etant donné une direction d permettant l'usinage en flanc d'une face F , considérons la fraise F_r de rayon non nul usinant F selon d comme présenté figure 75. Nous supposons que l'extrémité de cette fraise est droite, sa géométrie est donc assimilable à un cylindre. Pour usiner complètement F il faut que le point e extrémité du cylindre F_r soit situé sur l'arête A . Si l'angle α entre d et A au point de contact e est différent de 90° , F_r va mordre dans la face adjacente F_a , ce qui n'est pas admissible. Il faut par conséquent éloigner F_r de telle sorte que sa ligne extrémité (le cercle c) reste tangente en F à F_a . La conséquence est qu'une petite partie F_ε de F ne va pas être usinée, F_ε est appelé Epsi-masque de F selon d_i il contient l'arête A (au moins en partie). Cette zone n'est pas facile à calculer. A notre sens ce qui est important c'est de déterminer son existence et dans une mesure plus faible son allure par rapport à A . Cette information sera portée par l'arête.

$$\varepsilon Mt2(F, A, d_i) = F_\varepsilon$$

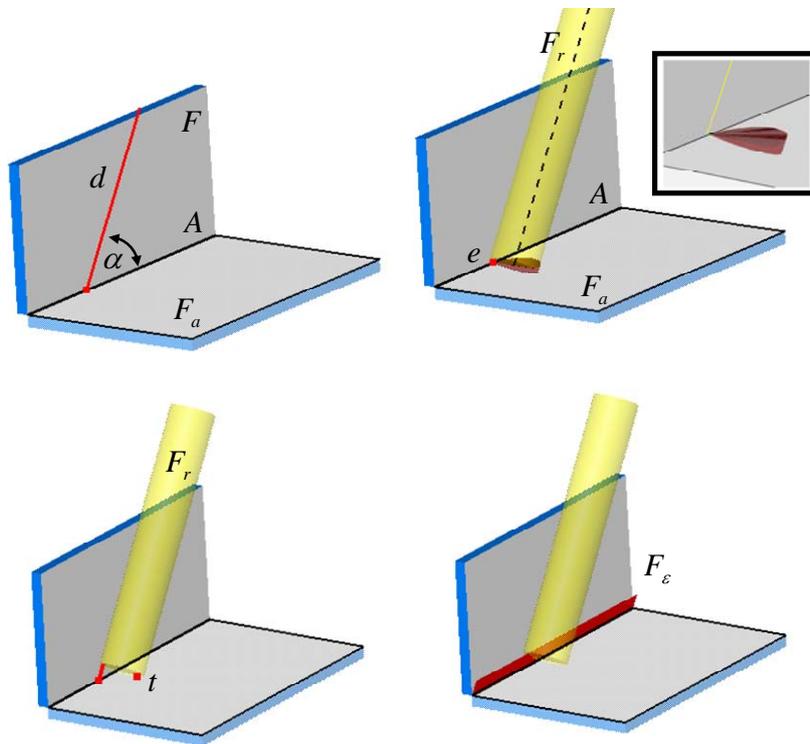


Figure 75. Les epsi-masques

Compte tenu des notions de masques que nous venons d'introduire et de la partie précédente concernant les calculs des accès d'usinage, la démarche de calcul d'usinabilité en flanc d'une face F quelconque va s'effectuer de la manière suivante :

- Calcul des obstacles susceptibles d'empêcher l'accessibilité à la face F
- Pour chaque d_i , déterminer les $Mt2L(F, d)$ et $\varepsilon Mt2(F, A, d)$
- Déterminer le regroupement des directions D « minimum » et calculer le $Mt2L(F, D)$. A cette étape il convient d'évaluer $\varepsilon Mt2(F, A, D)$,
- Prendre en compte les géométries d'outils.

III. Usinabilité d'une face F en bout

Nous allons maintenant aborder le calcul de l'accessibilité d'une face F usinable en bout. Cette accessibilité dépend du voisinage lointain de F . La direction de la fraise en bout étant N , normale de F , certaines faces voisines vont occulter une partie de F et interdire leur usinage suivant N . On est en présence d'un problème de visibilité. L'exemple ci contre illustre de manière schématique notre problématique. Etant donnée la face F et les obstacles O_F qui l'entourent, la zone non usinable $Mt1(F, N)$ pour la direction N (en rouge) est définie par les parties de F occultées par les O_F selon N .

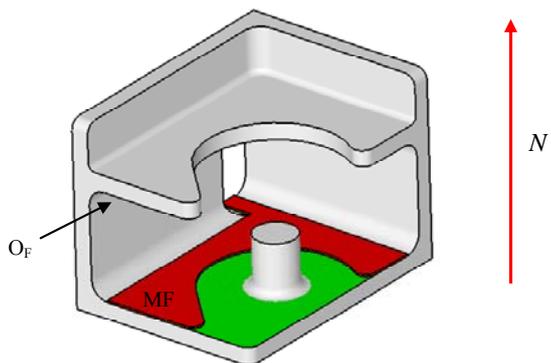


Figure 76. Usinabilité en bout

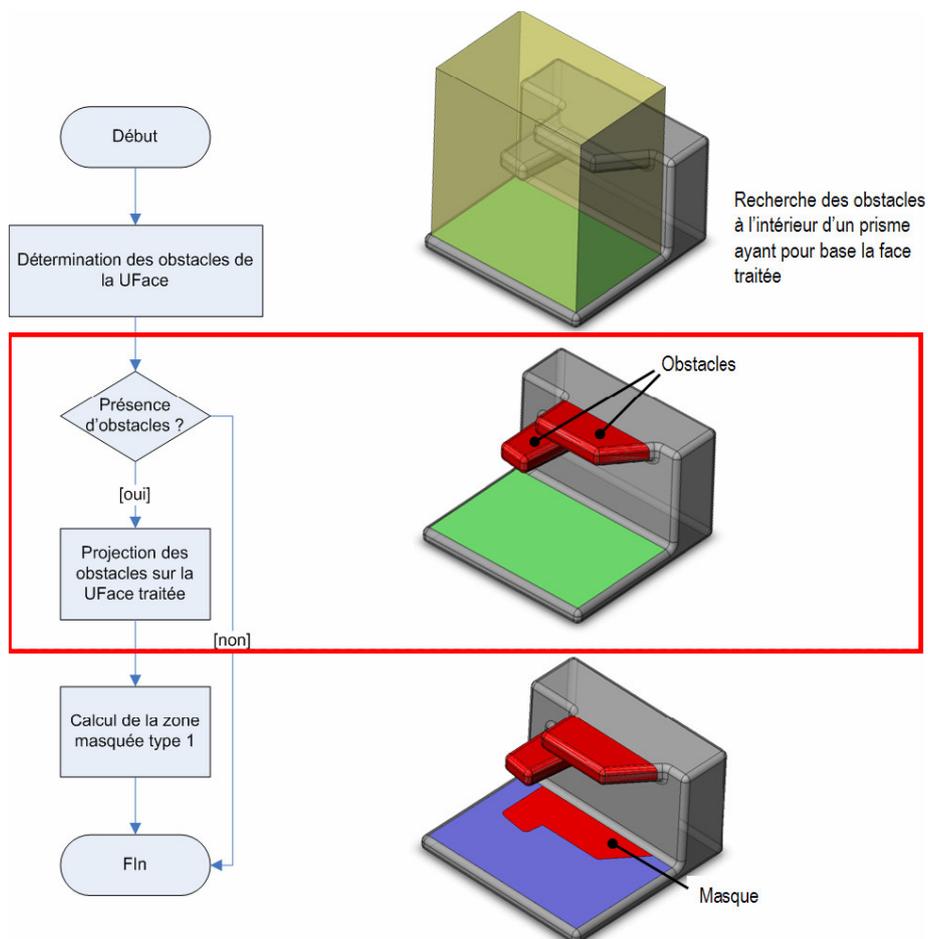


Figure 77. Calcul du masque de type 1 [DER 05]

L'approche algorithmique pour l'obtention des masques de type 1 reprend les travaux de [DER 05] (Figure 77). Par contre, nous proposons une approche nommée 'Projection Inverse' pour l'obtention des faces obstacles sur la face traitée.

La projection inverse consiste en 3 étapes :

- 1 – Extrusion de l'ensemble des faces des obstacles entièrement suivant la direction opposée à la normale de la face.
- 2 – Création du corps obstacle, union des extrusions obtenues ultérieurement.
- 3 – Intersection du corps obstacle avec la face d'origine.

IV. Usinabilité d'une face F en flanc

Nous allons maintenant aborder le calcul de l'accessibilité d'une face F usinable en flanc. Cette accessibilité dépend du voisinage proche et lointain de F . Pour une direction d donnée certaines faces voisines vont occulter une partie de F et interdire leur usinage suivant d . On est en présence d'un problème de visibilité. L'exemple ci contre illustre de manière schématique notre problématique. Etant donnée une face F et les obstacles O_F qui la bordent, la zone non usinable $Mt2L(F, d_i)$ pour la direction d est définie par les parties de F occultées par les O_F selon d . (Figure 78)

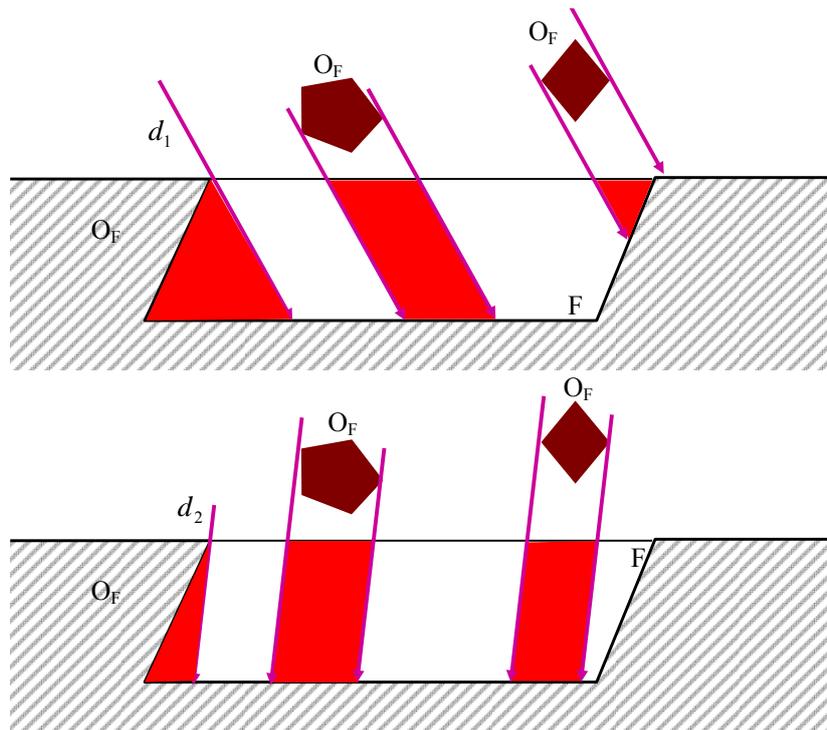


Figure 78. Détermination des zones non accessibles.

Pour obtenir l'usinabilité complète, nous calculons les zones non usinables par rapport aux différentes directions d'usinage. En intersectant ces zones, nous obtenons le masque de type 2 de F .

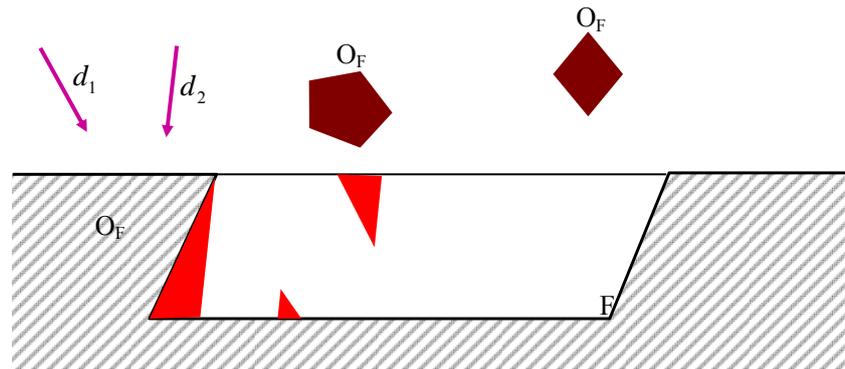


Figure 79. Intersection des zones non accessibles.

Il est clair que pour les faces réglées non planes l'ensemble des directions permettant leur usinage en flanc est pratiquement imposé; par contre pour les face planes les directions possibles sont très nombreuses, pour tenir compte de ces particularités nous avons scindé notre étude en 4 parties :

1. Les faces planes semi-ouvertes,
2. Les faces planes complètement ouvertes,
3. Les faces cylindriques,
4. Les faces réglées développables.

Généralement, la démarche se succède selon les étapes suivantes: détermination des obstacles, détermination de l'impact de ces obstacles sur les directions d'usinage individuellement, puis globalement, prise en compte de la géométrie outils.

CAS A - Etude des faces planes semi-ouvertes [HAR 06b]

L'existence de plusieurs directions d'usinage potentielles complexifie l'étude. L'algorithme (figure 80) décrit les différentes étapes pour l'obtention du masque de type 2.

Le nœud du problème consiste à déterminer les champs d'usinage des directions. Ce champ constitue les zones accessibles pour une direction donnée. Le masque de type 2 local $Mt2L(F, d_i)$ est calculé en retirant le champ d'usinage CU_i de la face d'origine F : $Mt2L(F, d_i) = F - CU_i$

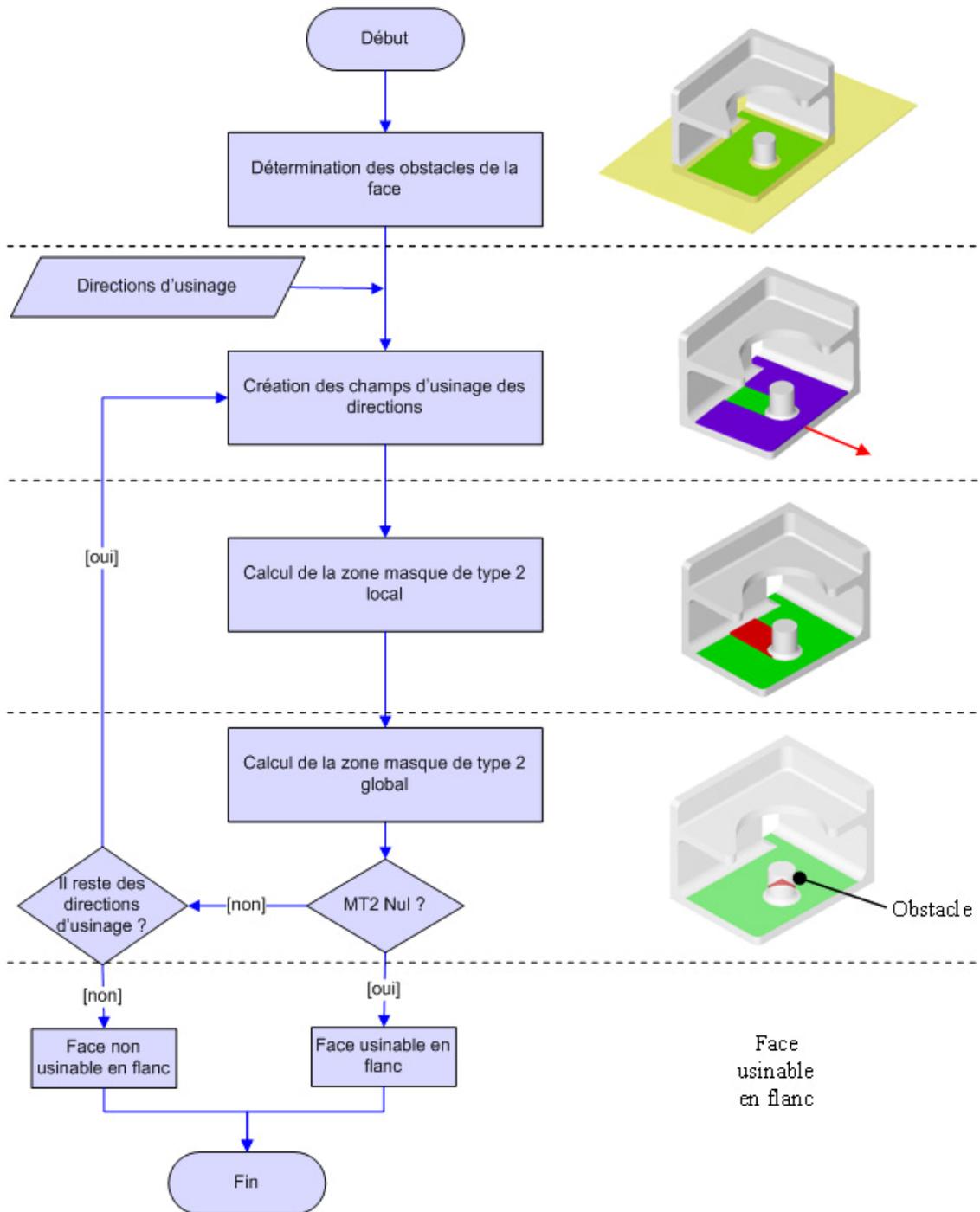


Figure 80. Calcul du masque de type 2

Le calcul des champs d'usinage peut s'effectuer selon deux logiques différentes :

Cas 1 – La direction d'usinage est prise en compte pour étudier toute la face.

Cas 2 – La direction d'usinage, qui est le résultat de l'étude intrinsèque d'une arête A , n'est prise en compte que pour la partie de la face limitée par l'arête A .

Cas 1: La direction d'usinage est prise en compte pour étudier toute la face

La première hypothèse facilite la tâche de calcul du champ d'usinage. On procède à un lancer de rayon dans un rectangle englobant contenant la face suivant la direction d'usinage d_i . Ces calculs aboutissent aux visibilitées globales V_G où le champ d'usinage est ensuite calculé $CU_i = V_G \cap F$. Le masque est alors $Mt2L(F, d_i) = F - CU_i$. La démarche se fait suivant les étapes suivantes :

1. Création du rectangle englobant 2D à partir des données des arêtes projetées. Cette boîte sert de base pour le lancement des rayons dans le sens des directions d'usinage.
2. Lancement des rayons selon la direction d'usinage d_i pour déterminer les parties visibles de la face selon cette direction. Ces rayons sont lancés à partir rectangle englobant 2D et s'arrêtent à la rencontre de matière.
3. Identification de la visibilité globale V_G en regroupant les différentes parties visibles. Cette visibilité comprend les champs visibles de la face et de son entourage.
4. La visibilité globale V_G englobe des zones n'appartenant pas à la face, d'où la nécessité d'identifier le champ d'usinage CU_i obtenue en intersectant la face d'étude F avec la visibilité globale V_G .

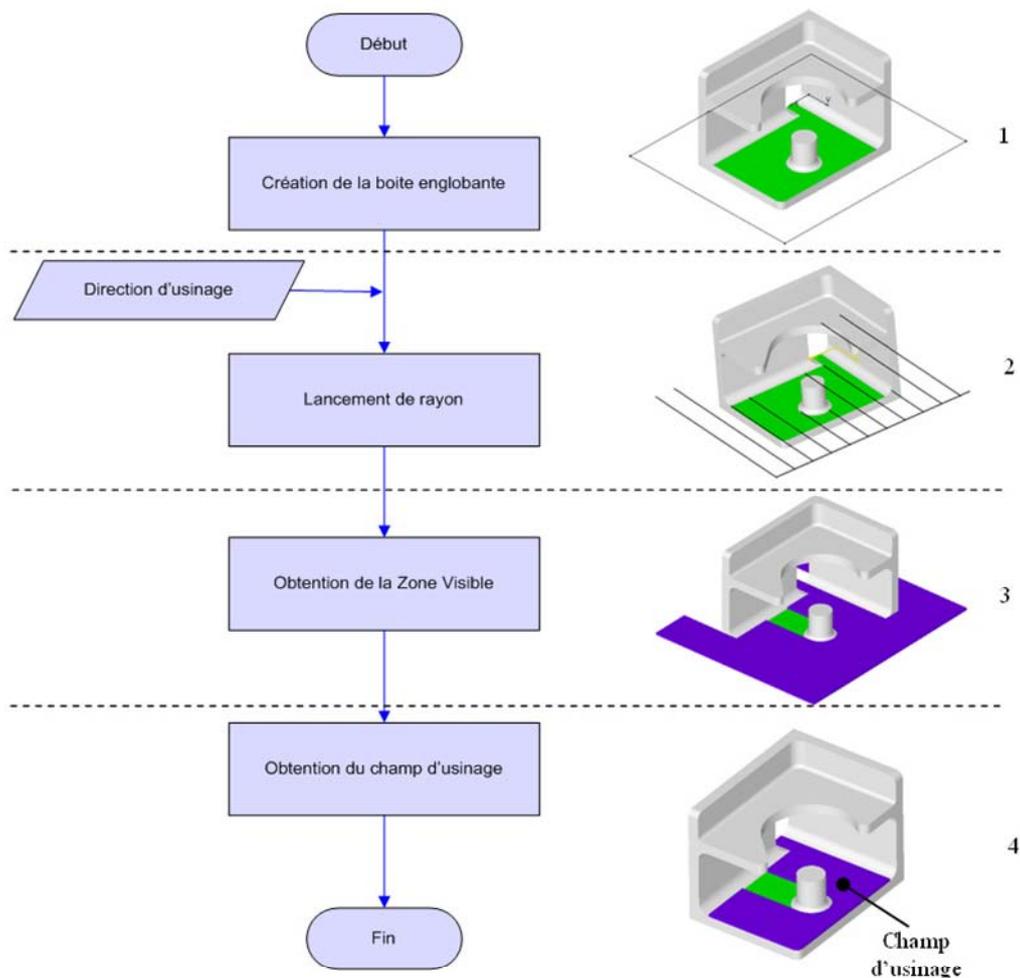


Figure 81. Calcul du champ d'usinage (cas 1)

Cas 2: La direction d'usinage n'est prise en compte que pour la partie de la face limitée par l'arête

Contrairement au cas précédent, ce cas limite le champ d'usinage d'une arête. Il nécessite une étape supplémentaire : l'extension (ou expansion) de l'arête si nécessaire. Les autres étapes sont relativement identiques à celles présentées dans le cas 1. A noter que le lancement de rayon se fait à partir de l'arête et non pas à partir d'une boîte englobante.

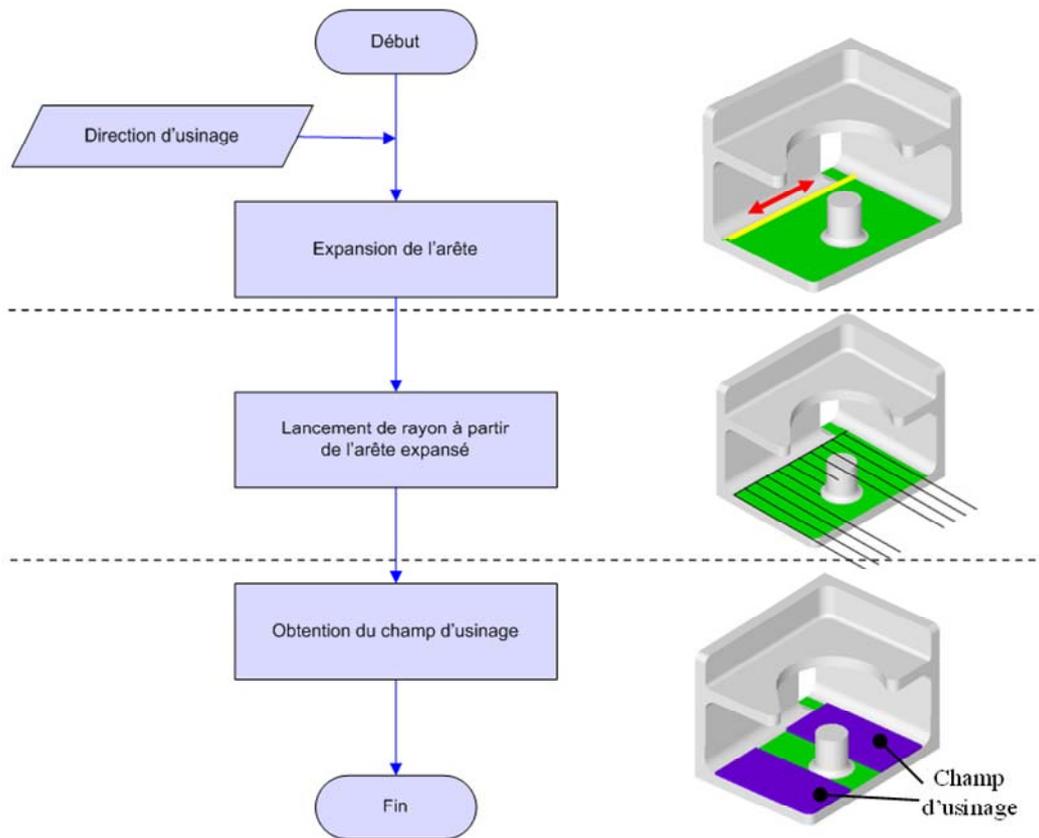


Figure 82. Calcul du champ d'usinage (cas 2)

L'extension d'une arête consiste à étendre l'arête en ses extrémités. Cette extension se fait tangentiellement aux points limitants l'arête jusqu'à la rencontre d'un obstacle ou la sortie de la matière.

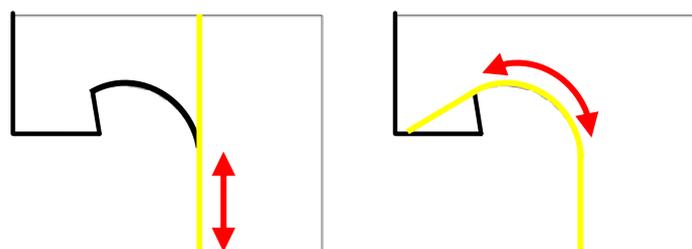


Figure 83. Extension des arêtes

Report de direction:

L'extension des arêtes induit aussi la notion de 'report de direction' sur l'arête adjacente. Pour les directions d'usinage non perpendiculaire à l'arête, nous proposons d'étudier la direction d'usinage sur les arêtes adjacentes.

Sur l'exemple (a) de la figure 84 ci-dessous on s'intéresse à l'étude de la direction en vert foncé. Cette direction est rattachée à toute la longueur de l'arête en vert clair.

De même, la partie (b) propose le report de direction dans le sens montré sur la figure.

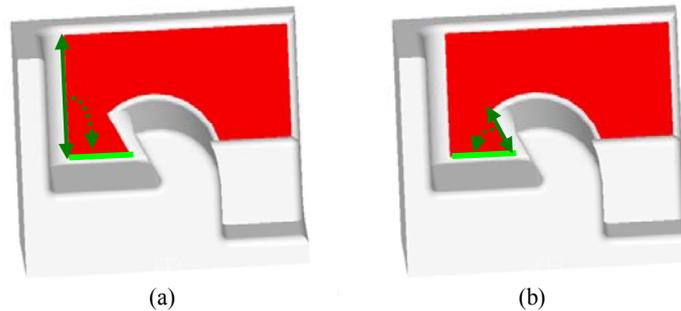


Figure 84. Report de direction

CAS B - Etude des faces planes ouvertes

L'accessibilité des faces planes complètement ouvertes ($F_{P,O}$) pour l'usinage en flanc est totale. On considère qu'elles sont accessibles suivant toutes les directions du demi espace limité par le plan de la face côté vide (Figure 85).

L'étude des faces planes ouvertes se réduit alors à une optimisation des directions d'usinage composant l'accès d'usinage. Ces faces $F_{P,O}$ situées à l'extérieur de la pièce appartiennent en général soit à un enchaînement de faces soit à un fond. Les fonds sont usinés de préférence en bout et non pas en flanc.

Reformulons notre souhait : Usiner des faces planes complètement ouvertes selon le mode d'usinage en flanc. Ces faces se répartissent selon deux groupes:

- Les faces entourées par des faces réglées ; elles participent à un enchaînement de faces. La direction d'usinage est l'axe du cylindre adjacent ou la continuité des règles des faces réglées adjacentes.
- Les faces sans aucune adjacence ; elles constituent des faces libres. La direction d'usinage est alors la largeur du rectangle circonscrit minimale.

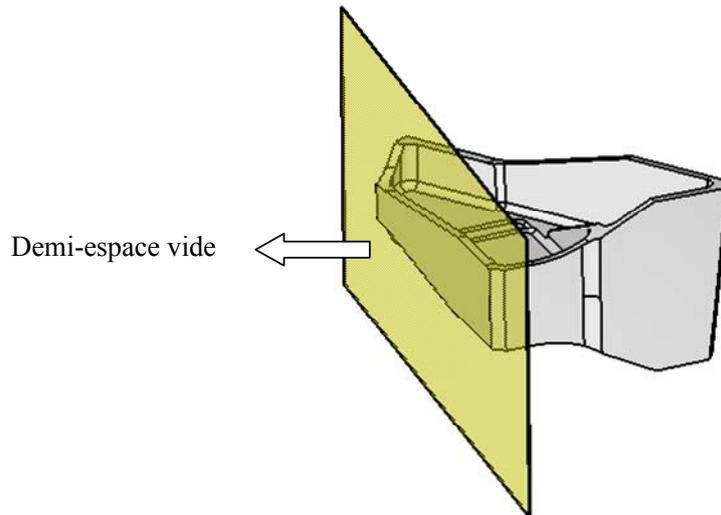


Figure 85. Faces planes complètement ouvertes

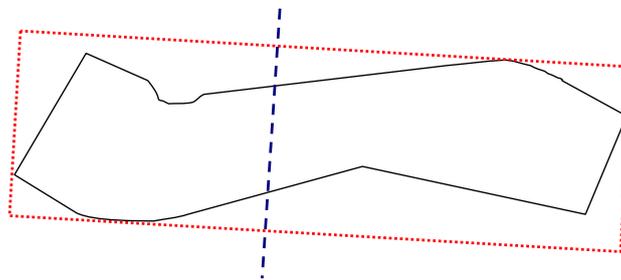


Figure 86. Largeur du rectangle circonscrit

Une attention est portée sur les lisses. Si la lisse représente des courbures différentes il faudra diviser le rectangle en plusieurs rectangles et construire des faces réglées pour la continuité de l'usinage.

CAS C - Etude des faces cylindriques

Idéalement l'usinage des faces cylindriques se fait en flanc selon l'axe du cylindre. Sinon, le cylindre sera fait en usinage 3T ou balayage. Les génératrices du cylindre doivent être débouchantes d'un côté au moins (Figure 87a ou b). Le cas où un obstacle est situé en milieu du cylindre est rare. Si ce cas se présente on traite le cylindre selon la méthode décrite pour l'étude des faces réglées quelconques.

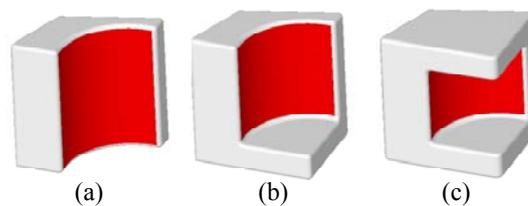


Figure 87(a) Cylindre bi-débouchant (b) Cylindre mono-débouchant (c) Cylindre non débouchant

CAS D - Etude des faces réglées quelconques

De très nombreuses faces des pièces qui constituent le fuselage de l'avion sont réglées. Ces faces sont usinables en flanc quand leurs génératrices sont débouchantes. Le cas échéant, ces faces seront usinées en balayage.

L'usinage en flanc ne peut se faire que suivant les règles (les génératrices). L'étude de l'accessibilité se fait en discrétisant la face par un ensemble suffisant de règles ($r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$) et en testant l'intersection de leurs demi-droites support (dr_1, dr_2, \dots, dr_n)⁺ et (dr_1, dr_2, \dots, dr_n)⁻ avec la géométrie, ces dr_i sont les demi-droites portées par la droite support des règles r_i et n'appartenant pas à r_i , il y en a 2 par règle et on les distingue avec les signes + et - (figure ci-dessous).

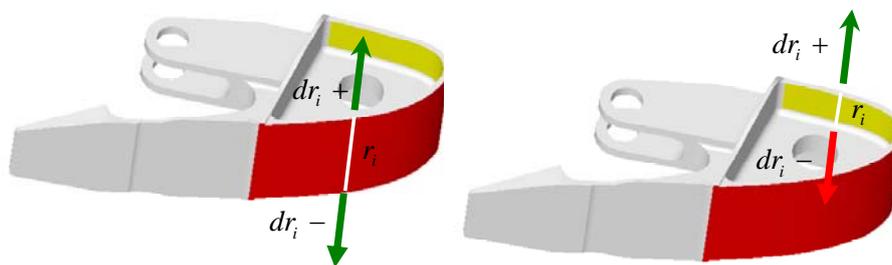


Figure 88. Etude extrinsèque des génératrices

Plusieurs cas sont alors possibles :

- toutes les demi-droites dr_i n'intersectent pas la géométrie, elles sont débouchantes des deux côtés et sont dites bi-débouchantes,
- toutes les demi-droites (dr_i)⁺ ou (dr_i)⁻ n'intersectent pas la géométrie, elles sont débouchantes d'un seul côté et sont dites mono-débouchantes (Figure),
- toutes les demi-droites (dr_i)⁺ ou (dr_i)⁻ intersectent la géométrie, la face est totalement masquée,
- pour un ensemble de valeurs de i , les (dr_i)⁺ ou (dr_i)⁻ correspondantes sont mono débouchantes et pour les autres valeurs de i les (dr_i)⁻ et (dr_i)⁺ sont débouchantes ou mono-débouchantes «de l'autre côté», la face n'est pas masquée,
- pour tous les autres cas la face est partiellement masquée.

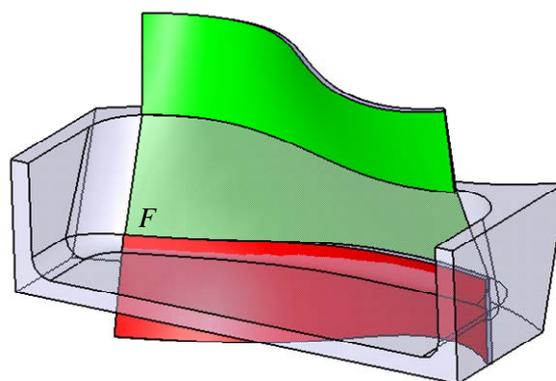


Figure 89. Face mono-débouchante, la partie rouge intersectant la matière est non accessible.

V. Caractérisation qualitative des epsi-masques

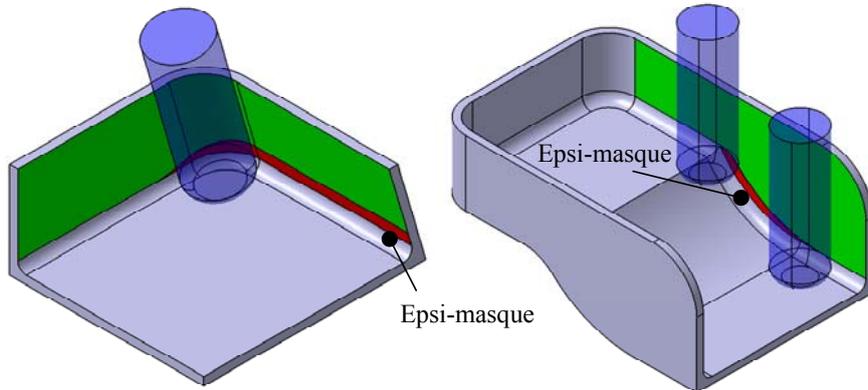


Figure 90. Epsi-masques

Si on usine la face verte de la figure 90 en flanc selon l'unique direction de la fraise bleue, une partie de la face ne sera pas usinée (en rouge), c'est un epsi-masque. Ce non respect de la géométrie CAO pourra être accepté ou non. Si non un usinage plus compliqué ou supplémentaire sera nécessaire, d'où une perte de temps et un coût supplémentaire (finition avec une fraise à bout sphérique).

Il est donc important de déterminer les zones qui vont comporter des epsi-masques et de les visualiser. Par contre la taille de l'epsi-masque qui dépend de la géométrie de la fraise et des directions d'usinage a moins d'importance. De plus la combinaison de plusieurs directions d'usinage peut aboutir à la disparition de l'epsi-masque résultant.

Ainsi, nous proposons une représentation des epsi-masques sur les arêtes et une algèbre ensembliste de caractérisation qualitative du résultat. Nous définissons deux notations qui seront portées par l'arête : '+' qui indique l'existence d'une surépaisseur et '-' qui indique l'usinage complet de la zone.

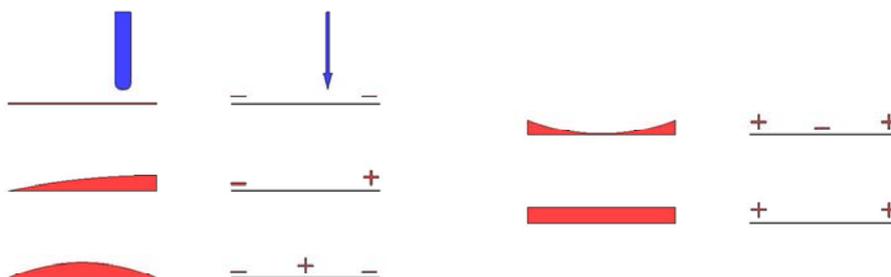


Figure 91. Caractérisation des epsi-masques

A la fin de l'étude d'une face, les arêtes porteront les différents résultats de caractérisation des epsi-masques. Pour obtenir le résultat final, nous additionnons les résultats suivant les règles d'union présentées figure 92.

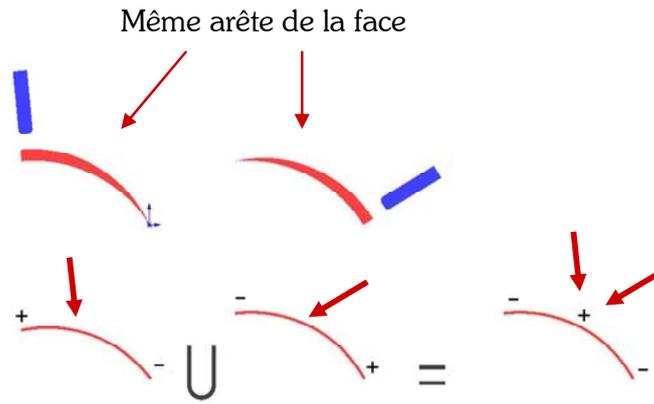


Figure 92. Caractérisation des epsi-masques

3. Outils capables

Cette troisième étape dans le processus d'enrichissement technologique des faces aboutit à la liste des outils et attachements possibles capables d'usiner la face F . Nous présentons dans la suite la géométrie d'outil standard et l'algorithme de reconnaissance.

I. Géométrie d'outil standard

La figure ci-dessous présente la géométrie standard d'un outil torique caractérisé par sa longueur coupante, son rayon de coin (rayon torique) et son diamètre. Quand le rayon du tore est égal au rayon de l'outil, ce dernier se nomme outil sphérique.

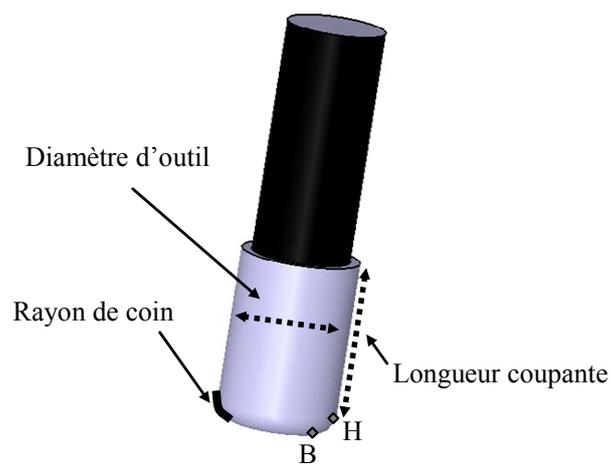


Figure 93. Géométrie d'outil torique standard

II. Algorithme de reconnaissance des outils capables

L'étude porte essentiellement sur la prise en compte de la géométrie d'outil pour l'usinage en flanc. La reconnaissance des outils capables doit tenir compte du rapport Longueur coupante/Diamètre : La longueur de contact outil matière ne doit pas être trop importante. Un grand rapport entraînera une vibration de l'outil donc une déformation.

Nous présentons les différentes étapes à entreprendre pour l'identification géométrique :

1. On discrétise les champs d'usinage visibles calculés auparavant.
2. Pour chaque discrétisation on calcule les coupes transversales (dans la normale à la face).
3. La longueur de la génératrice détermine la longueur coupante minimale l_c de l'outil. On se connectant à la base de données outil (tableau ci-dessous) on peut déterminer le diamètre minimal ϕ_{\min} .
4. Partant de la valeur du diamètre minimal ϕ_{\min} on incrémente une extrusion de la discrétisation jusqu'à l'obtention du diamètre maximal ϕ_{\max} .
5. La limite des champs d'usinage présente deux cas possibles :
 - a. Limite ouverte (sortie de la matière) ; aucune étude n'est nécessaire pour vérifier l'absence de collision.
 - b. Limite fermée (collision avec la matière) ; cette limite peut avoir une tangence ou une vivacité d'angle vif. Dans le cas d'une tangence on prend en compte le rayon minimal de la tangence dans la détermination du diamètre minimal ϕ_{\min} des outils possibles. Le cas échéant, la présence d'une vivacité d'angle vif indique l'existence d'une reprise nécessaire. Cette reprise est due au retrait de la fraise d'une valeur égale au diamètre final ϕ sélectionné.

Outil	Longueur	Longueur coupante	Diamètre	Rayon de coin
	mm	mm	mm	mm
1	13	8	4	1
2	40	16	16	4
3	40	16	16	2
4	40	16	16	4
5	67	16	25	4
6	85	24,5	12	6
7	100	20	32	4
8	110	16	32	4
9	130	28,5	20	10

Tableau 6. Tableau des outils capables (source, Dassault Aviation)

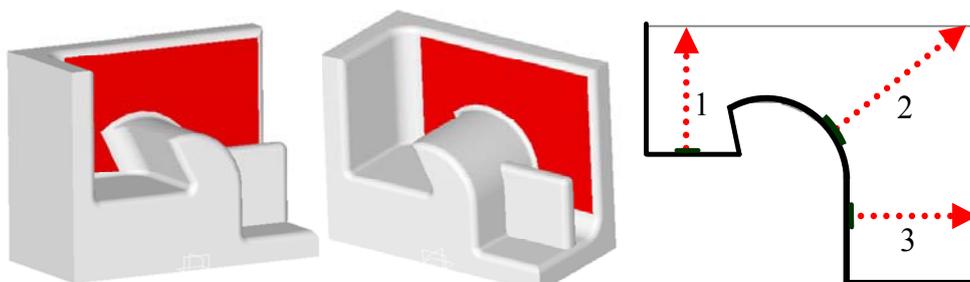


Figure 94. Face et directions d'étude

A titre d'exemple, on procède à l'application des étapes suggérées pour la face en rouge de la figure 94.

Direction 1

Données d'entrée :

- La longueur de la direction est de 45 mm, ce qui élimine les outils 1, 2, 3 et 4.
- L'adjacence à l'extrémité de l'arête est un cylindre de rayon=8mm ce qui élimine l'outil 6.
- L'arête de parcours est adjacente à un congé de rayon 4mm ce qui élimine l'outil 9.

La liste des outils possible devient 5,7 et 8. On procède aux extrusions de la direction dans le sens de la normale à la face. Ces extrusions auront comme valeur les diamètres des outils pour vérification de collision. On élimine par la suite les outils en collision avec la matière. Le tableau ci-dessous montre les outils capables d'usiner la direction 1.

Outil	Longueur	Longueur coupante	Diamètre	Rayon de coin
	mm	mm	mm	mm
5	67	16	25	4
7	100	20	32	4
8	110	16	32	4

Tableau 7. Tableau des outils capables pour la direction 1

Direction 2

Données d'entrée :

- La longueur de la direction est de 44,5 mm, ce qui élimine les outils 1, 2, 3 et 4.
- Les adjacences aux extrémités sont libres.
- L'arête de parcours est adjacente à un congé de rayon 4mm ce qui élimine les outils 6 et 9.

La liste des outils possible devient 5, 7 et 8 (comme la précédente). On élimine par la suite les outils en collision avec la matière (suite aux extrusions). Le tableau ci-dessous montre les outils capables d'usiner la direction 2.

Outil	Longueur	Longueur coupante	Diamètre	Rayon de coin
	mm	mm	mm	mm
5	67	16	25	4
7	100	20	32	4
8	110	16	32	4

Tableau 8. Tableau des outils capables pour la direction 2

Direction 3

Données d'entrée :

- La longueur de la direction est de 25 mm, ce qui élimine l'outil 1.
- L'adjacence à l'extrémité de l'arête est un cylindre de rayon=8mm ce qui élimine l'outil 6.
- L'arête de parcours est adjacente à un congé de rayon 4mm ce qui élimine l'outil 9.

La liste des outils possible devient 2, 3, 4, 5, 7 et 8. On élimine par la suite les outils en collision

avec la matière (suite aux extrusions). La figure ci-dessous montre les différents cas des outils.

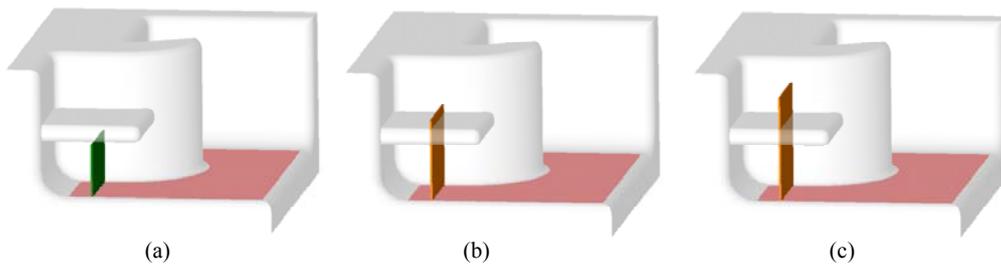


Figure 95. Différentes extrusions et résultats

Les outils 2, 3 et 4 ont un diamètre de 16mm. L'extrusion correspondante (figure a) n'entre pas en collision. L'outil 5 possède un diamètre de 25 mm, son extrusion (figure b) entre en collision. De même pour les outils 7 et 8 pour lesquels l'extrusion (figure c) entre en collision.

La liste des outils capables devient 2, 3 et 4.

Outil	Longueur	Longueur coupante	Diamètre	Rayon de coin
	mm	mm	mm	mm
2	40	16	16	0
3	40	16	16	2
4	40	16	16	4

Tableau 9. Tableau des outils capables pour la direction 3

Au final, on rassemble les différents résultats et ils seront présentés de la manière suivante :

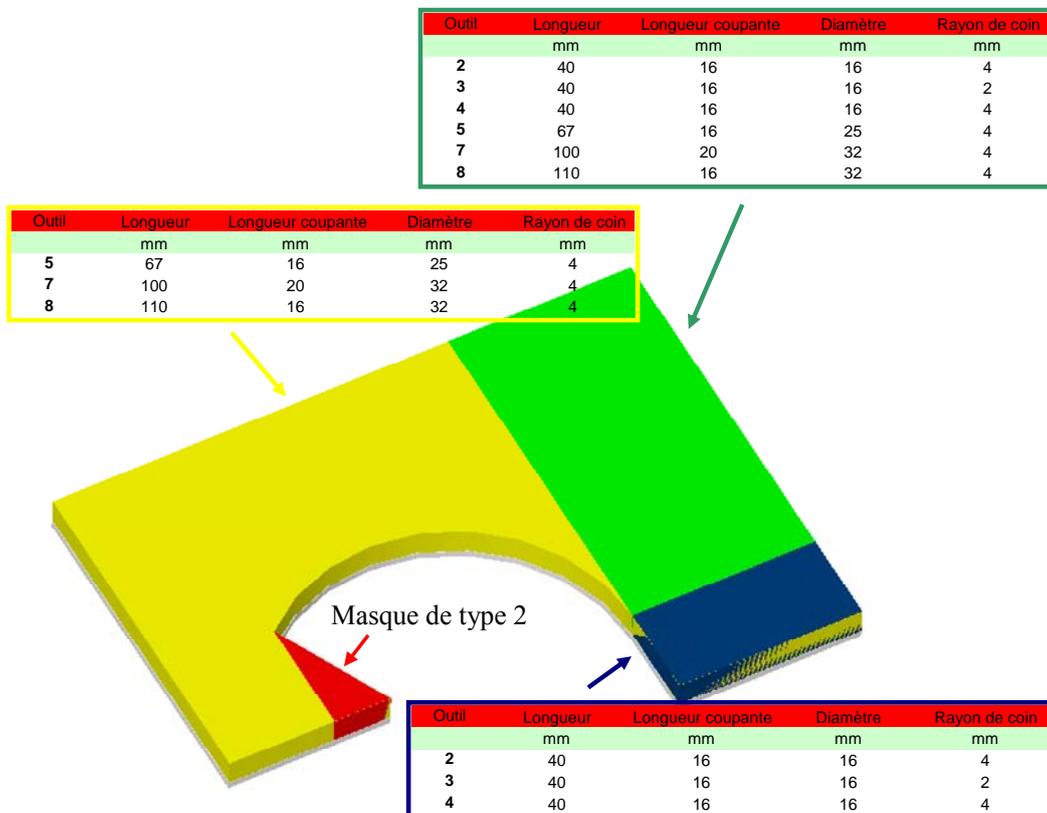


Figure 96. Résultat final de l'approche volumique.

4. Typage

En étudiant l'ensemble des faces de la pièce, on distingue les cas spécifiques suivants :

Plan en bout : caractérise une géométrie plane accessible uniquement en UEB.

Plan en flanc : caractérise une géométrie plane accessible uniquement en UEF.

Plan libre : caractérise une géométrie plane accessible à la fois en UEB et UEF, sans aucune préférence entre ces deux modes d'usinage.

Profil : caractérise une géométrie réglée non plane accessible en mode UEF.

Raccordement : caractérise les géométries issues des rayons de raccordement. Ces rayons de raccordement peuvent résulter de l'usinage de l'une des entités voisines ou être usinés séparément (opération de reprise des rayons).

Cassage : caractérise les géométries issues des arêtes ouvertes de longueur affectant la sécurité du personnel transportant les pièces (Les normes diffèrent selon les usines). Ces faces nécessiteront un cassage d'angle au niveau de ces arêtes.

Coins 5 axes : Le coin 5 axes est un cylindre (ou une face réglée) adjacent à 2 faces planes (ou réglées). Ce cas ne peut pas être traité avec les règles métiers décrites précédemment, car il y aurait un conflit de règles (comme présenté sur l'exemple de la figure ci-dessous), les plans devant être usinés suivant d_1 et d_2 et le cylindre devant être usiné suivant d_3 .

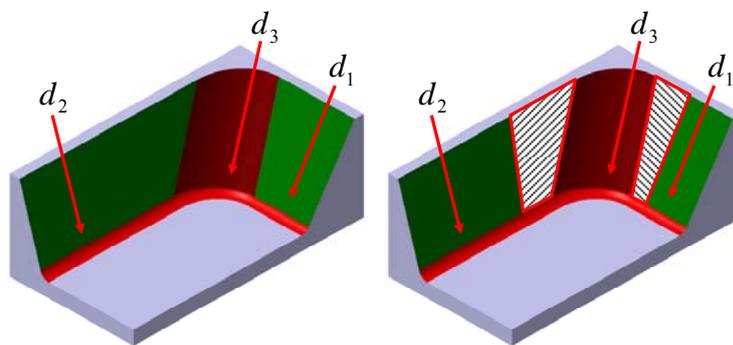


Figure 97. Coins 5 axes

Dans ce cas, on peut créer des faces réglées intermédiaires qui font le lien entre les plans et le cylindre. Ces faces sont créées pour permettre l'inclinaison de l'axe pour passer de d_1 à d_3 et de d_3 à d_1 en assurant une continuité de l'usinage. Remarquons que le long de l'arête de fond des faces ajoutées (hachurées dans l'exemple) et du cylindre on va trouver des epsi-masques.

Extrémité d'élanement : caractérise les éléments étroits des parois élancées (les voiles, semelles, âmes et raidisseurs). Ces entités se démarquent des précédentes car ce sont les seules qui sont définies à partir de considérations géométriques.

5. Conclusion et extension du modèle géométrique enrichi

Cette deuxième étape d'enrichissement technologique élémentaire transforme les faces en des faces 'fabricabilité'. Le concept d'entité d'usinage élémentaire (face fabricabilité), appliqué sur une face, permet de lui affecter les informations d'usinage la concernant. Les différents attributs calculés (Accès d'usinage, Mode d'usinage, Outils capables et typage) conditionnent les moyens d'usinage et les enchaînements à effectuer ultérieurement. Ces attributs séparent les faces en plusieurs entités d'usinage élémentaire. La prise en compte de ces attributs aboutit au modèle des entités d'usinage élémentaires ci-dessous.

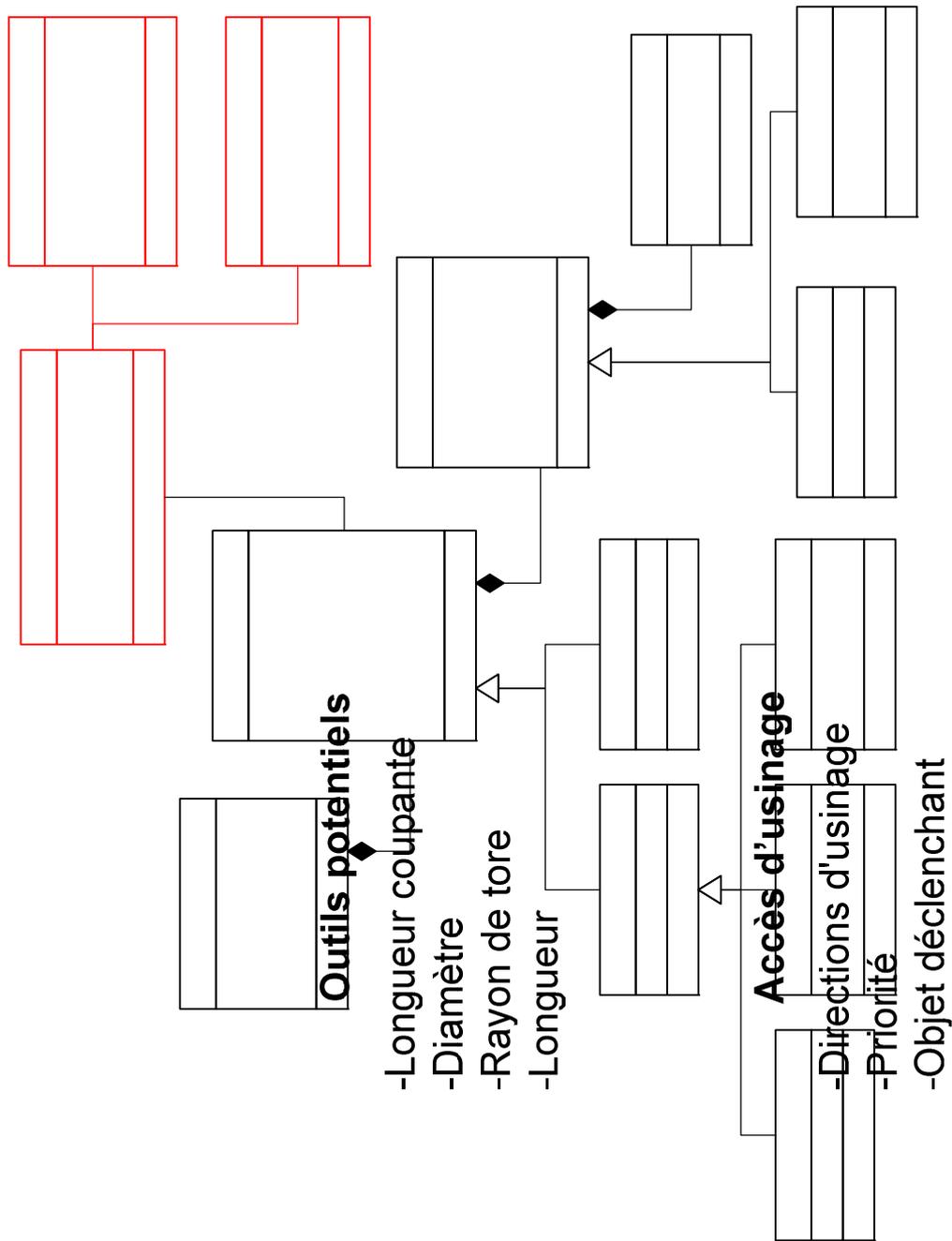


Figure 98. Modèle des entités d'usinage élémentaires

ire d'usinage

C. Graphes d'enchaînements

Cette dernière étape pour l'obtention du modèle USIQUICK regroupe les différentes EUE (entité d'usinage élémentaire) en des EU (entités d'usinage) de niveau sémantique supérieur. Ce regroupement se fait par une analyse de graphe d'adjacence. Le graphe d'adjacence des faces d'une pièce P modélisée en B-Rep est représenté figure 99.

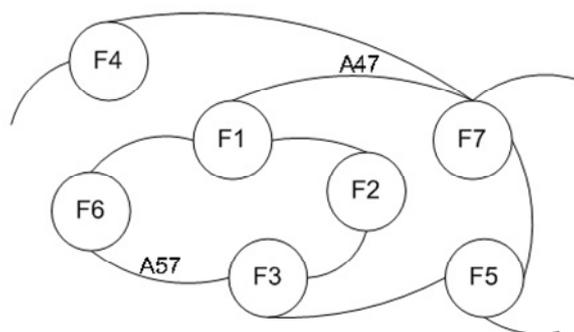


Figure 99. Graphe d'adjacence traditionnelle

Les nœuds représentent les faces F qui constituent la pièce P et les arcs reliant deux faces, F_1 et F_2 par exemple représentent l'arête commune $A_{1,2}$ qui définit la frontière délimitant F_1 et F_2 .

Nous proposons dans la suite d'exploiter l'enrichissement technologique au niveau des entités élémentaires d'usinage et la typologie des liens entre ces faces (la vivacité des arêtes communes) afin de regrouper des ensembles de faces susceptibles d'être considérées comme un tout du point de vue d'une opération d'usinage. Ainsi le graphe sera enrichi et redessiné en couleur de manière à visualiser les enchaînements potentiels. Arcs et faces étant typés, le graphe sera exploité pour la reconnaissance des entités d'usinage type et pour une vérification de ces entités par le biais d'une comparaison entre les directions d'usinage proposées.

1. Pièce exemple et son graphe d'adjacence

La pièce (Figure 100) est utilisée pour expliquer le graphe d'adjacence « coloré », ainsi que sa construction.

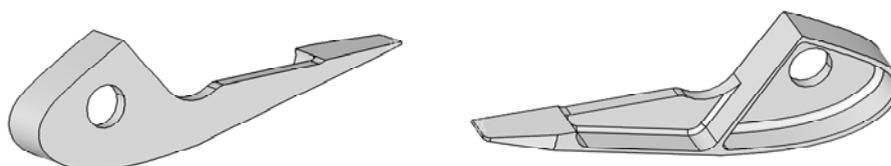


Figure 100. Pièce d'étude

Cette pièce comprend 32 faces et 36 arêtes. Son graphe B-Rep d'adjacence des faces est présenté figure 101. Nous allons enrichir ce graphe afin de permettre la compréhension de la pièce d'un point de vue usinage et d'en extraire des sous graphes représentant des Entités d'usinage (EU).

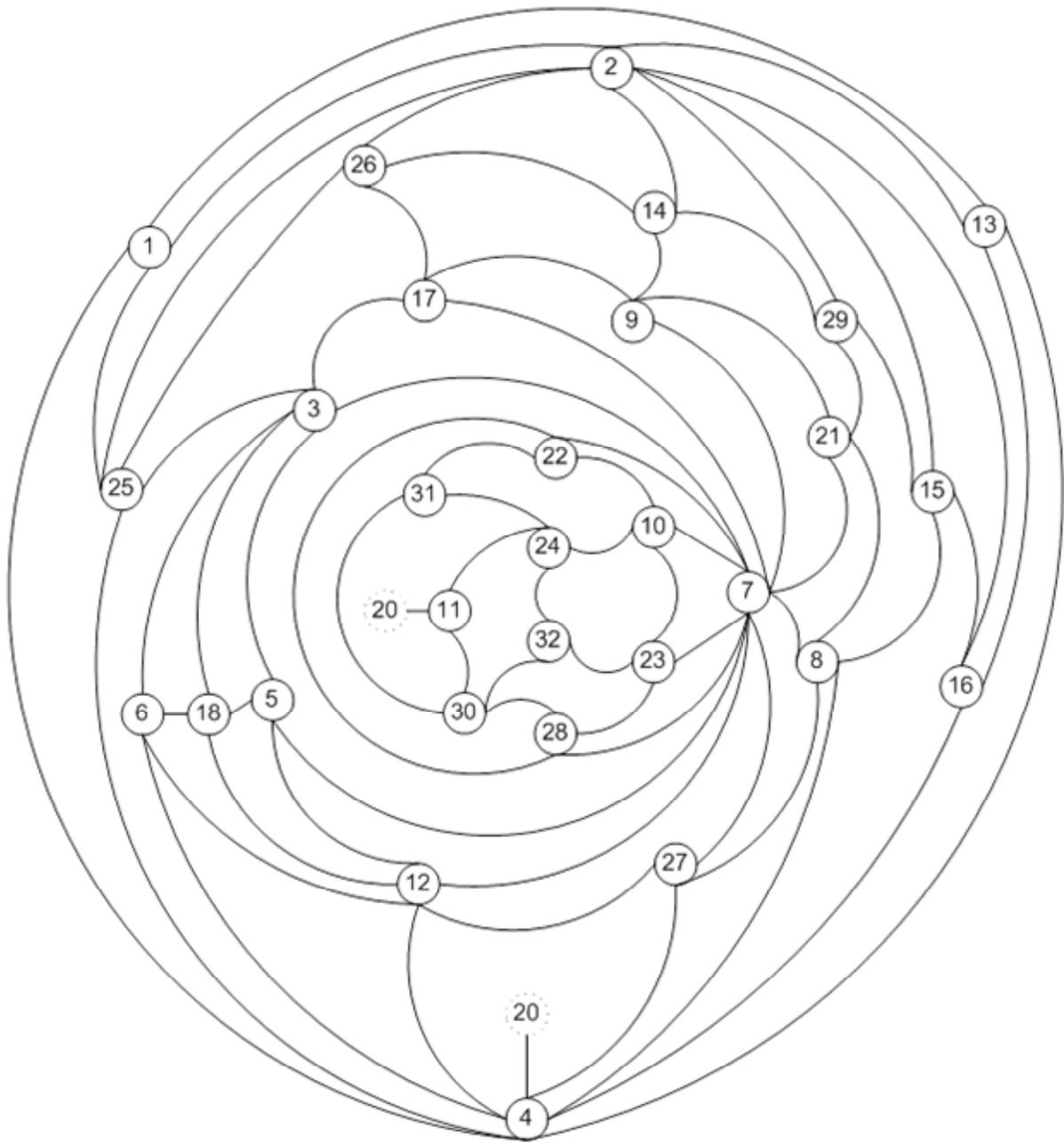


Figure 101. Graphe d'adjacence

2. Vers la construction du graphe d'adjacence USIQUICK [HAR 07a]

Le graphe d'adjacence proposé garde les mêmes liaisons, mais distingue les faces en fonction de leur typage et les arêtes en fonction de leur vivacité. Nous proposons dans la suite la taxinomie de séparation des faces et des arêtes, puis nous l'appliquons au graphe ci-dessus.

I. Les sommets du graphe

Dans notre démarche, nous séparons les faces suivant le type de l'entité d'usinage élémentaire qu'elles portent. Ces EUE sont regroupées selon le mode d'usinage. Ainsi nous distinguons les groupes suivants :

- (F) Les faces usinables en flanc,
- (B) Les faces usinables en bout,
- (L) Les faces libres,
- (R) Les congés de raccordement,
- (E) Les extrémités d'élanement.

Pour prendre en compte ces différents types au niveau du graphe nous complétons les sommets du graphe par les attributs : F, B, L, C et E. Par exemple, un sommet B4 identifie une face réalisée en bout. Pour une meilleure compréhension nous attribuons également une couleur à chaque type des EUE (Figure 102).

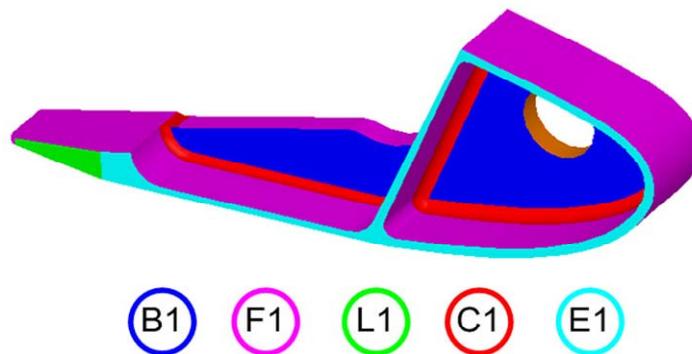


Figure 102. EUE de la pièce d'étude

II. Les arcs du graphe.

Ces arcs sont importants. En effet, nous complétons le graphe en affectant des attributs et des couleurs différentes en fonction de :

- La typologie des nœuds limites,
- La nature de l'arête.

Les faces libres pouvant se comporter comme des faces UEF et UEB, lors des traitements nous les considérons comme des faces ayant l'attribut B ou F suivant les cas. Les vicinités prises en compte sont : V_{TF} (Tangente Fermée), V_F (Fermée), V_{TO} (Tangente ouverte) et V_O (Ouverte). Les vicinités V_P (Prolongement) et V_I (Inflexion) se comportent comme la vicinité T.



Figure 103. Liaison entre face 1 et face 2

Avec 5 possibilités de nature pour les nœuds 1 et 2, et 4 possibilités de liaison entre ces deux nœuds, nous avons plus de 40 possibilités. En ne conservant que les 8 cas réellement possibles, nous obtenons le tableau des liaisons ci dessous.

Face 1	Lien	Face 2	Couleur	Potentiellement ...
C	F/TF	C		Chaîne de congés
E	X	E		Chaîne d'éléments étroits
F	TF	F		Chaîne de flanc de poche
F	O/TO	F		Chaîne de flanc externe
F	TF	C		Flanc de poche
B	TF	C		Fond de poche
B	O/TO	E		Fond mince
F	O/TO	E		Haut d'ailes

Tableau 10. Tableau des liaisons

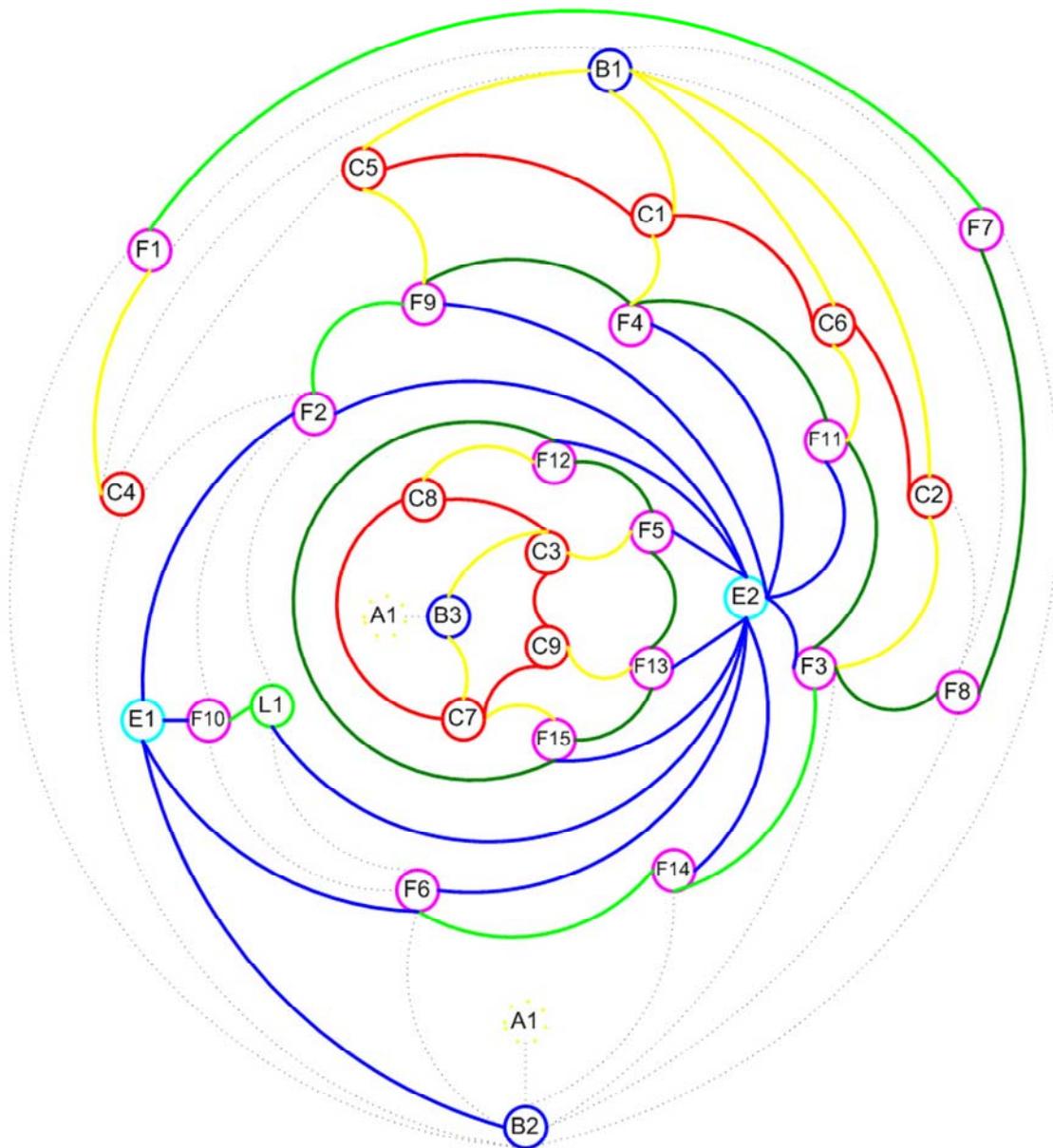


Figure 104. Graphe colorié

3. Lecture du graphe

Le graphe est fortement dépendant de la capacité des EUE à se relier à leur entourage par le biais des liaisons potentielles. Nous présentons dans la suite les différents enchaînements potentiels par lecture du graphe.

I. Chaîne de raccordements (rouge – Figure 105)

Nous distinguons deux types de chaînes de raccordements : Les chaînes ouvertes et les chaînes fermées. Sur le graphe, les chaînes de raccordements se manifestent par une liaison rouge. Elles constituent une frontière de séparation. Une chaîne fermée constitue sûrement une poche fermée : d'un côté de la chaîne nous aurons un processus en flanc, de l'autre un processus en bout. Une chaîne ouverte constitue potentiellement une poche ouverte.

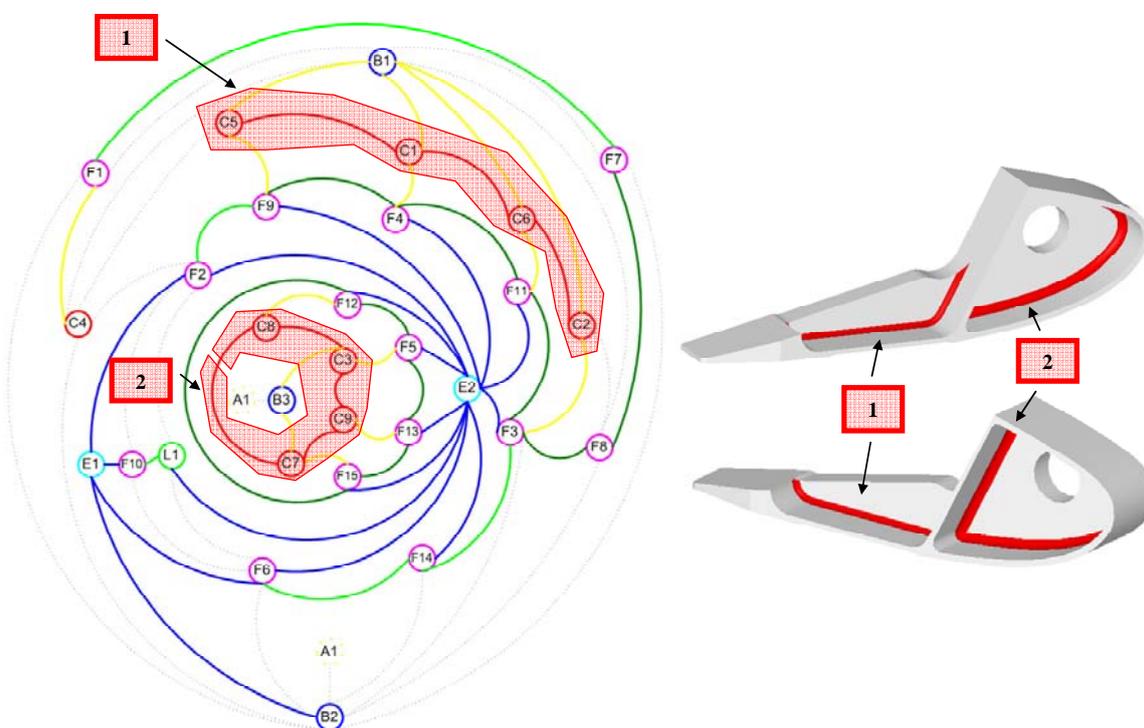


Figure 105. Chaînes de raccordement

II. Chaîne d'éléments étroits et entités minces potentielles (bleu ciel –Figure 106)

Les éléments étroits qui s'enchaînent peuvent constituer une extrémité d'élanement commune concernant la même entité mince. L'identification se fait par une liaison bleu ciel. Identiquement les liaisons ouvertes avec des faces en flanc ou en bout peuvent constituer le flanc d'un haut d'aile potentiel, ou respectivement, d'un fond mince potentiel.

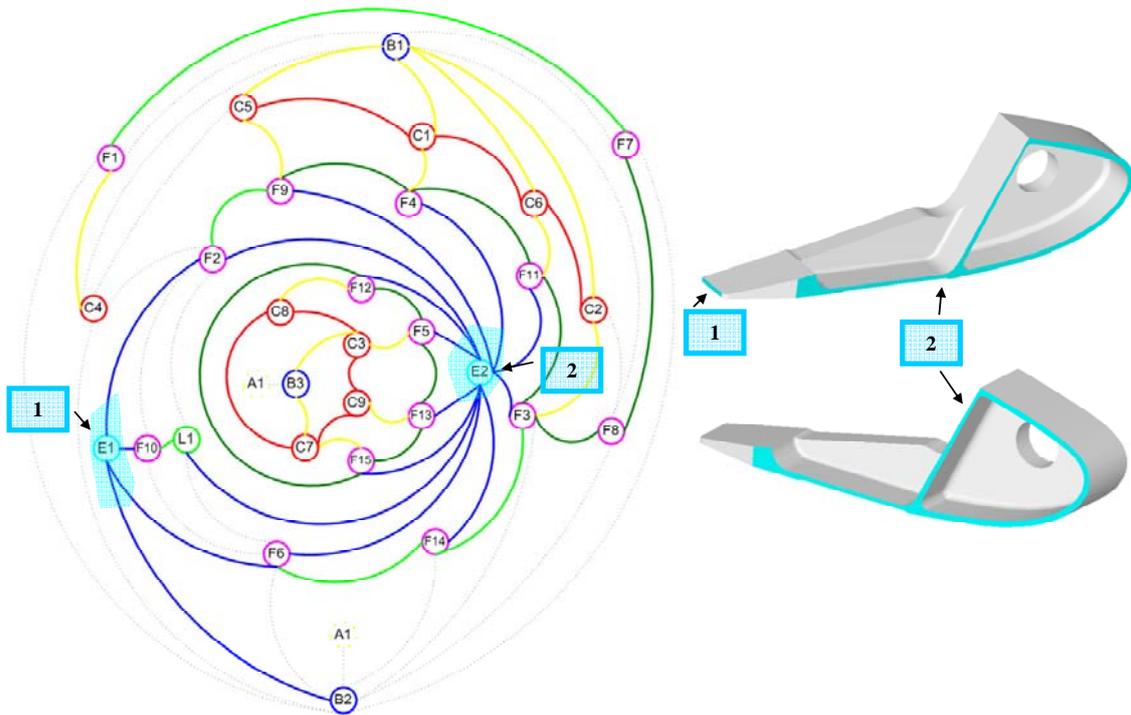


Figure 106. Eléments minces potentiels

III. Chaîne de flanc de poche (vert foncé – Figure 107)

Les faces usinables en flanc qui s'enchaînent avec des liaisons tangentes fermées constituent un enchaînement de flanc de poche. Les liaisons sont en vert foncé. Ce sont des enchaînements obligatoires qui peuvent participer à une entité poche.

IV. Chaîne de flanc externe (vert clair – Figure 108)

Les faces usinables en flanc qui s'enchaînent avec des liaisons tangentes ouvertes constituent un enchaînement en flanc externe. Les liaisons sont en vert clair. Ces enchaînements participent à une entité flanc externe.

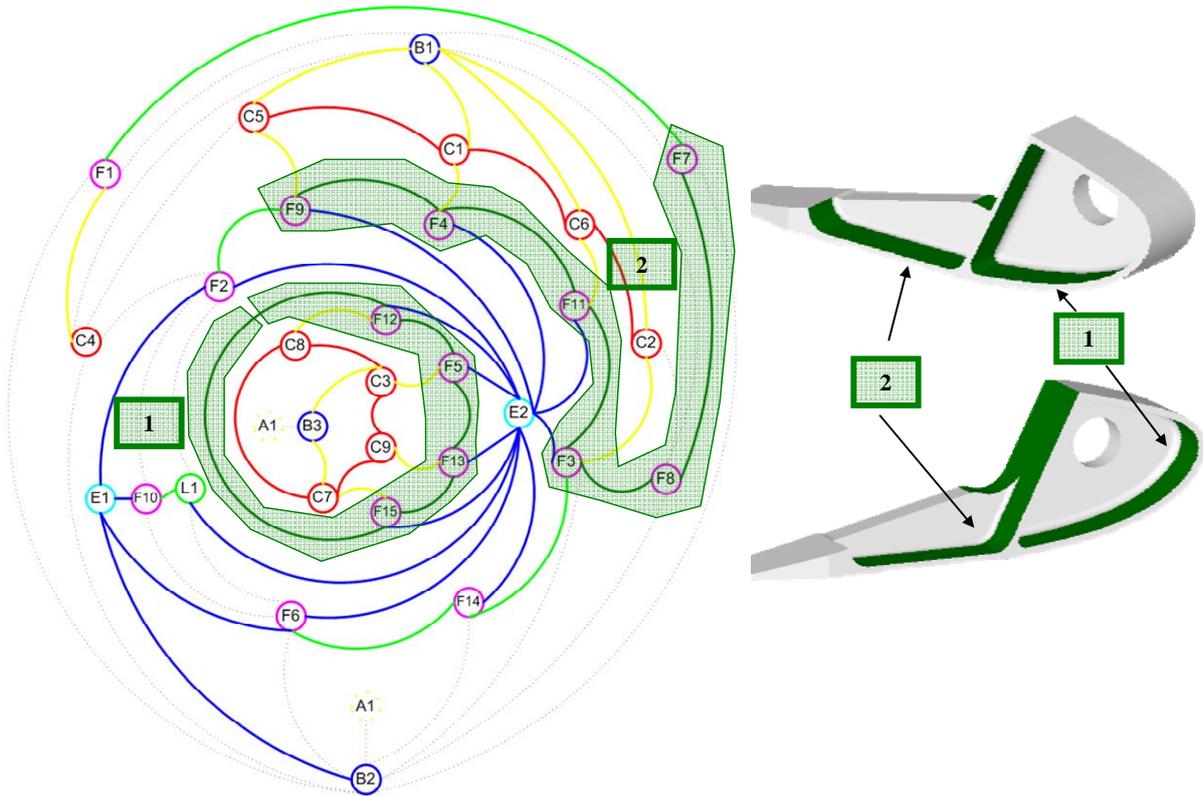


Figure 107. Flanc de poche

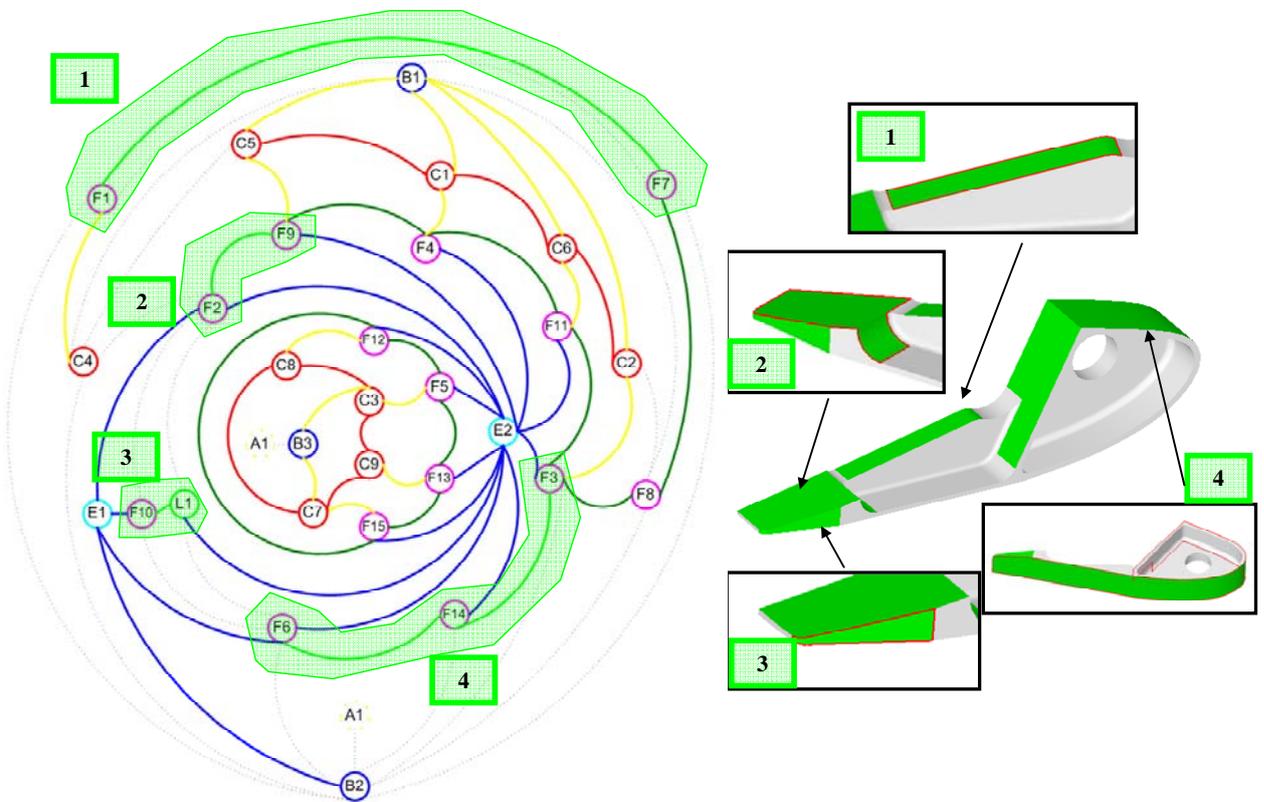


Figure 108. Enchaînement de flanc externe

4. Typage des entités d'usinage

Cette typologie est générique pour décrire la majorité des enchaînements relatifs aux pièces de structure analysées. Nous couplons le graphe d'enchaînement avec les données des EUE pour reconnaître les cas spécifiques suivants :

I. Entité de surfaçage (2 axes et demi)

Une entité de surfaçage (2 Axes et demi) est reconnue si elle valide les conditions suivantes :

- Type EUE: face usinable en bout,
- Nature EUE: ouverte,
- Direction en bout de l'EUE: colinéaire a la normale de l'entité référence.

II. Entité Poche (2 axes et demi / 5 axes)

Une entité poche regroupe une 'Chaîne de flanc de poche' en liaison TF avec une 'Chaîne de raccordement' en liaison TF avec un 'fond de poche'. Une entité poche possède les attributs : Nature, Axes et Type.

La nature correspond à poche fermée ou poche ouverte. Cet attribut est défini identiquement à la nature de la chaîne de raccordement.

L'attribut axes nécessite l'étude des directions d'usinage de la chaîne de flanc de poche. Si les directions se réduisent à une seule, la poche sera baptisée 2 axes et demi, sinon la poche sera 5 axes.

L'étude de l'angle entre le 'fond de poche' et le 'flanc de poche' détermine si la poche est en dépouille, contre dépouille ou normale.

III. Entité multi poches (3 axes)

Une entité multi poches caractérise le regroupement des différentes entités poches qui possèdent des 'fonds de poche' plans parallèles.

IV. Entité Flanc externe (2 axes et demi/5 axes)

Une entité flanc externe est identifiée par une chaîne de flanc externe. L'étude des directions d'usinage définit si cette entité est 2 axes et demi ou 5 axes. Si les directions d'usinage sont parallèles notre entité est définie flanc externe 2 axes et demi, sinon elle est 5 axes.

V. Entité Mince

Caractérise l'existence d'une EUE étroite délimitant une EUE en mode UEB et/ou UEF. L'étude des entités minces sera détaillée dans le prochain paragraphe.

5. Les 'Entités Minces' [HAR 07b]

Lors de l'usinage d'une pièce, l'outil exerce des efforts sur les zones usinées qui - si elles ne sont pas suffisamment rigides - vont se déformer. On risque d'aboutir à une pièce dimensionnellement mauvaise comportant des éléments d'épaisseur inégale, tordus et même fendus ou brisés. Les entités qui posent de tels problèmes sont les entités minces : les hauts d'aile et les fonds minces. Si le concepteur CAO n'utilise pas de fonctions spécifiques pour définir des entités minces, les modèles géométriques CAO tels qu'ils existent actuellement ne mémorisent aucune information permettant de les déterminer simplement et donc de les traiter convenablement. C'est le préparateur FAO qui doit les reconnaître pour ensuite les usiner en respectant quelques règles « métiers ». Par expérience et éventuellement en procédant à quelques calculs simples – il sait déterminer quels sont les ensembles de faces qui constituent des hauts d'aile et des fonds minces et quels sont les posages et les montages d'usinage nécessaires à leur bonne réalisation. Il sait également comment il doit procéder pour usiner convenablement la pièce.

Les entités minces sont donc des entités d'usinage particulières, elles correspondent à des ensembles géométriques constitutifs d'une pièce nécessitant une approche d'usinage définie selon des règles « métiers ».

Nous présentons dans la suite la définition des entités minces suivi par un algorithme de détection de ces dernières.

I. Définition des entités minces

La figure ci-dessous donne une 1ère définition de ces deux entités.

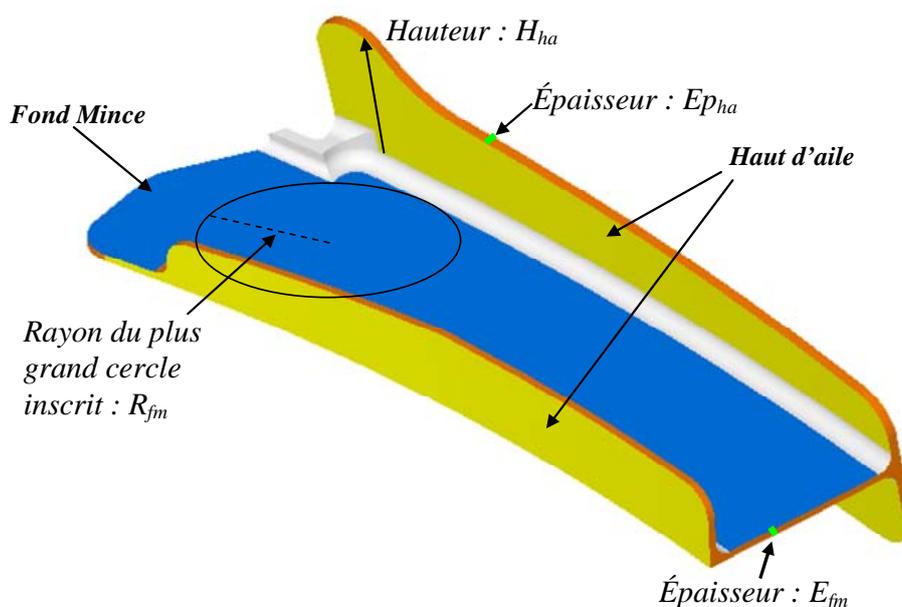


Figure 109. Définition générale des hauts d'aile et fonds minces.

Hauts d'ailes

Avec les notations de la figure 109, l'ensemble géométrique est considéré comme un haut d'aile s'il vérifie la condition:

$$\frac{H_{ha}}{Ep_{ha}} < \lambda$$

Dans le cas Dassault Aviation la valeur du rapport est donnée par:

$$\lambda = 7$$

Fonds minces

L'ensemble géométrique est un fond mince si sous un effort de 10 N le fléchissement maxi f_{max} du fond, sous l'action de la fraise, est supérieur à 0,01 mm. Le calcul de f_{max} est fonction du type de la poche : ouverte ou fermée. Il se calcule en prenant en compte le module d'élasticité du matériau, l'épaisseur E_{fm} et des dimensions comme le rayon du plus grand cercle inscrit dans la face, la longueur de(s) l'arête(s) libre(s) ...

Déterminer à partir du modèle géométrique si une face appartient à un haut d'aile ou à un fond mince présente quelques difficultés. La figure 110 illustre sur un exemple simple l'une de ces difficultés.

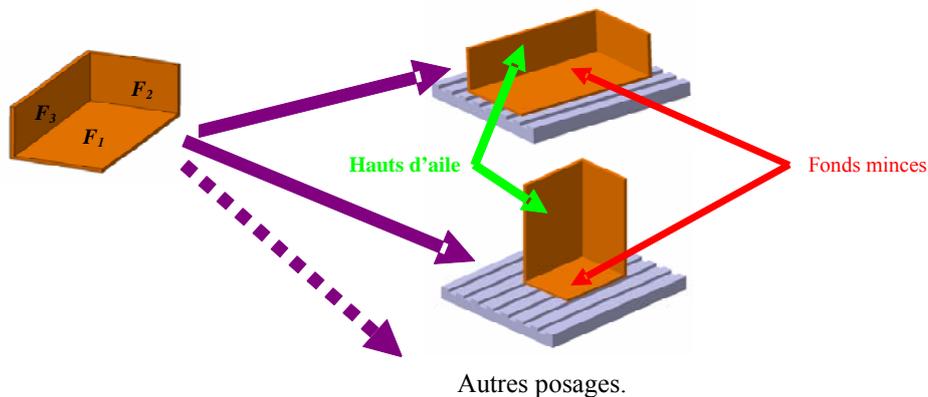


Figure 110. Suivant le posage les faces F_1 , F_2 , F_3 participent à un fond mince ou à un haut d'aile.

Suivant la manière dont la pièce sera « posée » sur la table, les faces F_1 , F_2 et F_3 et leurs faces adjacentes devront être considérées soit comme appartenant à des fonds minces, soit comme participant à des hauts d'ailes.

II. Point de flexion des 'Fonds minces'

Pour qu'une face appartienne à un fond mince, il faut :

- qu'elle soit de type UEB,
- qu'il existe sur cette dernière au moins un point qui - sous un effort ponctuel de 1kg - fléchit d'une valeur supérieure à 0.01 mm.

La flexion dépend du voisinage du fond. Nous présentons ci-dessous son calcul simplifié. Si nécessaire il peut se faire en utilisant les modules Analyse et Simulation de type « calcul de structure ».

Pour une même géométrie de face F , suivant la manière dont F est « accrochée » aux faces voisines, F fléchira plus ou moins pour un même effort et le point de flexion maxi ne sera pas situé au même endroit.

On distingue 3 grands cas (figure ci-dessous) : les fonds fermés, semi-ouverts et ouverts.

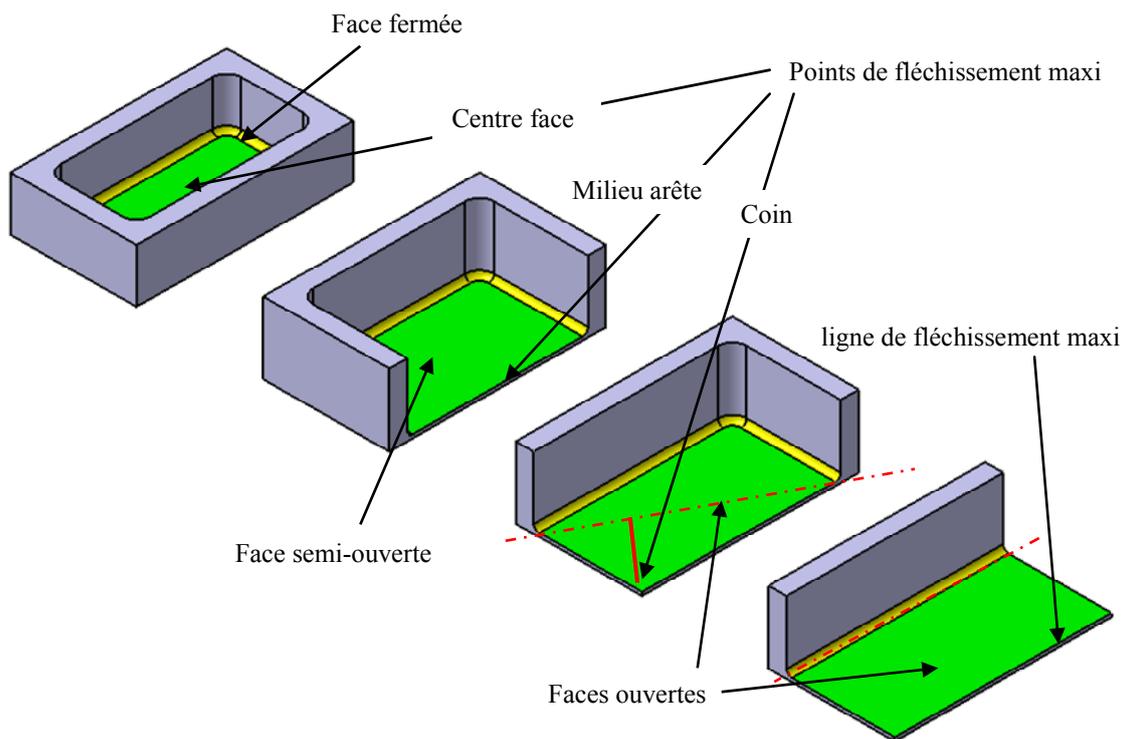


Figure 111. Différents cas des fonds minces

De plus si en opposition à la face F se trouve un « renfort » R , il faut ne considérer que les parties de face délimitées par R (figure 112). Soit pour l'exemple ci-dessous F_1 et F_2 .

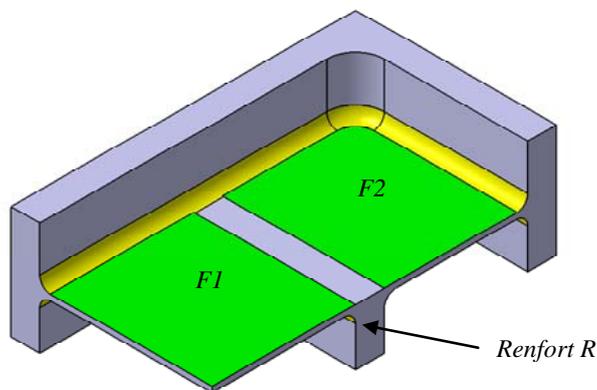


Figure 112. Présence d'un renfort

Suivant le type de face, le point de fléchissement maxi est calculé différemment.

Pour une face fermée, il est situé au centre du plus grand cercle inscrit au contour de la face. Le centre de ce cercle se trouve à l'intérieur du contour offset le plus grand et son rayon est égal à la valeur de cet offset, soit off_{max} . Si E désigne l'élasticité du matériau (en MPa), e (en mm) l'épaisseur de la face, la valeur de la flèche maxi f_{max} (en mm) est donnée par :

$$f_{max} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{Ee} \left(\frac{2 \cdot off_{max}}{e} \right)^3$$

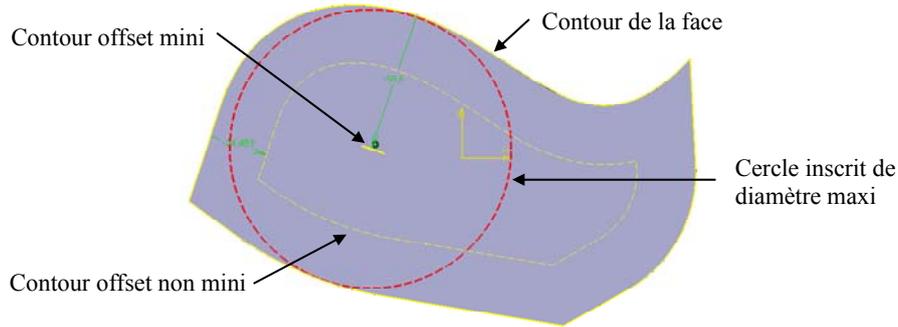


Figure 113. Point de fléchissement d'une surface fermée

Pour une face semi-ouverte (Figure 114), c'est le « milieu » de(s) l'arête(s) libre qui fléchit le plus. Si AB est la longueur (en mm) de l'arête libre la flèche maxi f_{mil} vaut :

$$f_{mil} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{Ee} \left(\frac{AB}{e} \right)^3$$

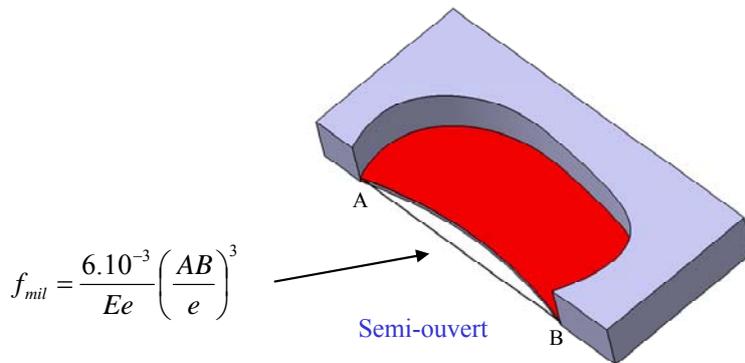


Figure 114. Point de fléchissement d'une surface semi-ouverte

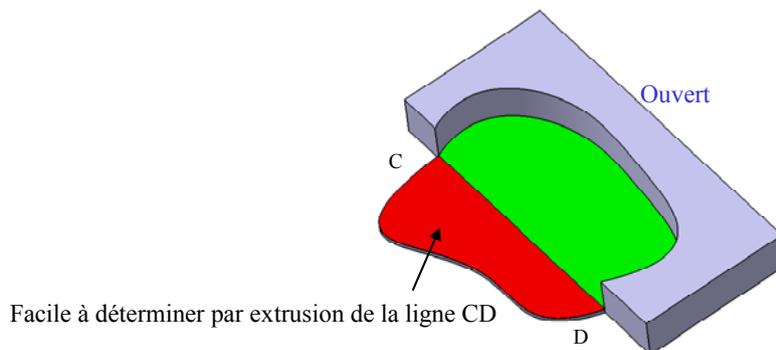


Figure 115. Point de fléchissement d'une surface ouverte

Pour une face ouverte (figure ci-dessus) c'est le point extérieur se trouvant à la plus grande distance de l'axe passant par les sommets *CD*. Ce point peut être calculé facilement en polygonisant les contours.

III. Algorithme de détection des entités minces

Nous présentons les différentes phases de l'algorithme de détection des entités minces. Ce paragraphe se décompose en quatre phases, dont les trois premières sont successives, la dernière n'intervient qu'après la définition du posage.

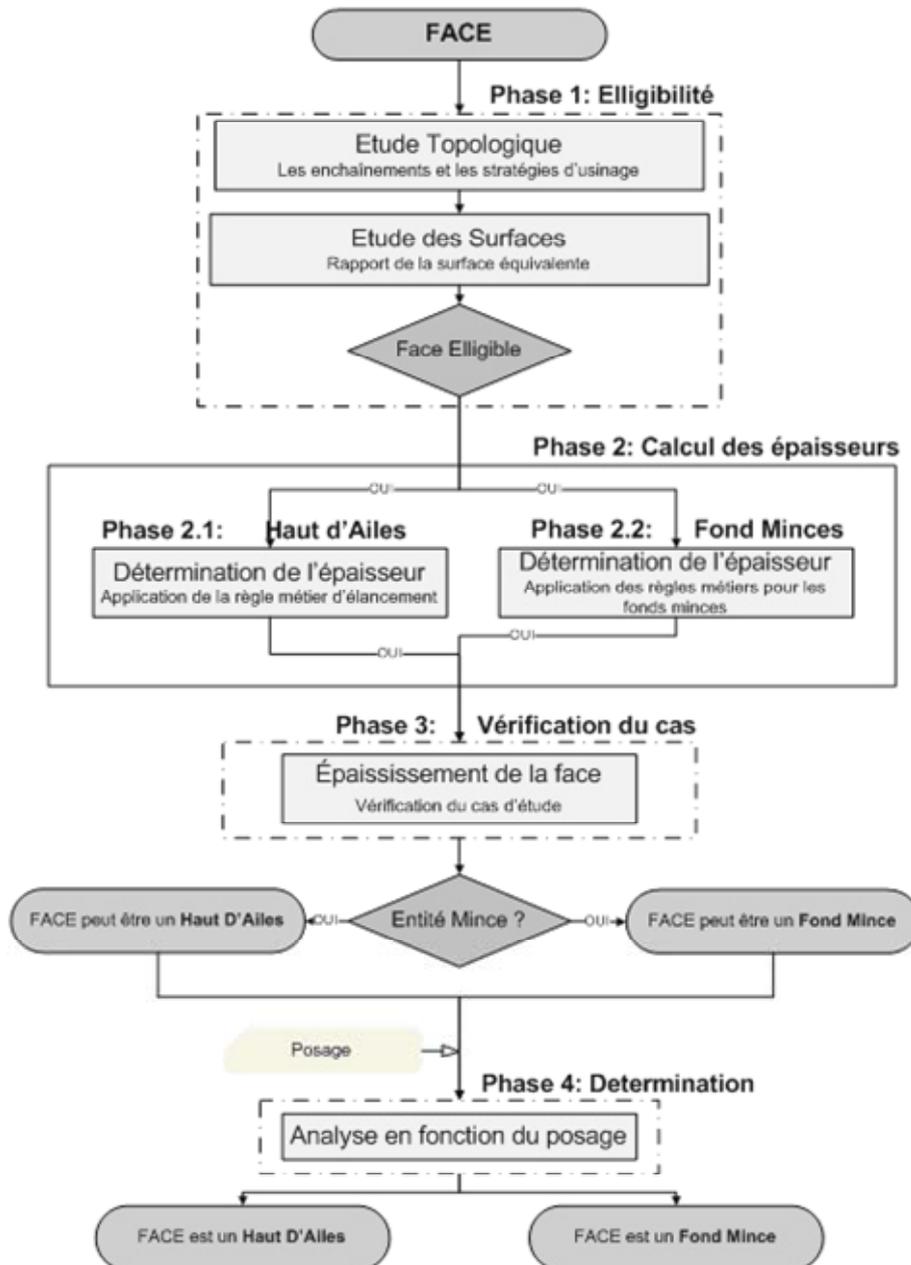


Figure 116. Différentes phases de l'algorithme de reconnaissance des entités minces

Ces étapes, présentées figure 116, se déroulent pour chaque face de la manière suivante :

Eligibilité (phase 1) : La face est étudiée pour déterminer sa susceptibilité d'appartenir à une entité mince. Cette étude couple deux attributs: usinabilité de la face et l'étroitesse de son entourage. *A la fin de cette phase, seules les faces déclarées éligibles sont transmises à la phase suivante.*

Calcul de l'épaisseur théorique (phase 2) : En utilisant les règles métiers pour les hauts d'ailes et les fonds minces, on calcule l'épaisseur théorique qui définit la face comme susceptible d'appartenir à un haut d'aile ou à un fond mince. *A la fin de cette phase nous avons une valeur d'épaisseur. Il ne doit pas y avoir de la matière au-delà de cette épaisseur pour que la face soit un élément mince.*

Vérification du cas (phase 3) : Nous épaississons la face d'étude dans le sens de la matière, et nous étudions l'extrémité du corps obtenu. Cette face sépare la face en deux parties : celle mince et celle non minces. Une de ces deux parties peut être nulle. *A la fin de cette phase certaines faces sont qualifiées comme minces, et d'autres ont une sous partie qualifiée comme mince.*

Détermination (phase 4) : En prenant en compte le posage effectif, les faces issues de la phase précédente sont typées définitivement en hauts d'ailes ou flancs de haut d'aile, fonds minces ou faces non accessibles selon le posage.

Nous présentons maintenant de manière détaillée ces différentes phases.

Phase 1 : Eligibilité d'appartenir à une entité mince

Une pièce est composée d'un très grand nombre de faces, tester toutes les faces pour déterminer si elles appartiennent ou non à des entités minces risque de prendre énormément de temps. Nous présentons une technique qui doit permettre de limiter les traitements. Cette phase prend en compte l'usinabilité de la face et l'étroitesse des faces voisines. On réduit ainsi le nombre de faces à étudier en séparant les faces en trois groupes : faces éligibles pour l'étude des fonds minces, faces éligibles pour l'étude des hauts d'ailes et faces ne présentant pas les caractéristiques des entités minces.

* **l'usinabilité**

Typiquement l'usinage des hauts d'ailes se fait en flanc et celui des fonds minces en bout. La détermination des hauts d'ailes ou des fonds minces va donc pouvoir se faire en partie grâce à l'analyse des modes d'usinage associés aux faces.

* **l'étroitesse**

Si une face a une frontière commune avec un élément étroit elle peut participer à un haut d'aile, il en est de même pour les fonds minces ouverts.

* **L'éligibilité**

A partir de ces 2 caractéristiques les faces sont traitées et classifiées ainsi :

- toutes les faces **complètement fermées** sont éligibles d'appartenir à un **fond mince**.
- toutes les faces **usinables en bout** et possédant une **adjacence ouverte** vers une **face étroite** sont éligibles d'appartenir à un **fond mince**.

- toutes les faces **usinables en flanc** et possédant une **adjacence ouverte** avec une **face étroite** sont éligibles d'appartenir à un **haut d'aile**.

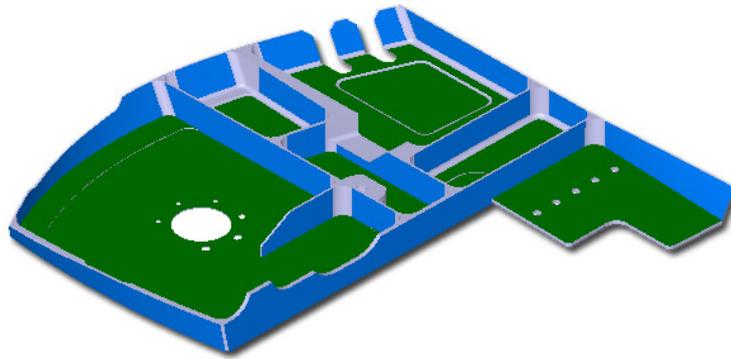


Figure 117. La pièce est décomposée en plusieurs groupes : les fonds minces potentiels (faces vertes) et les hauts d'ailes potentiels (faces bleues).

Phase 2 : Détermination de l'épaisseur critique

En utilisant les règles métiers pour les hauts d'ailes et les fonds minces, on procède au calcul de l'épaisseur critique ε_c qui définit la face comme susceptible d'appartenir à un haut d'aile ou à un fond mince.

Détermination de l'épaisseur critique concernant les hauts d'ailes

La règle métier concernant les hauts d'ailes est :

$$\frac{h}{\varepsilon} \geq K \quad (K = 7 ; \text{ Dans le cas industriel de Dassault Aviation})$$

Où h est la hauteur d'élanement et ε est l'épaisseur d'aile.

Ayant calculé les directions d'usinage et l'usinabilité en flanc, on peut déduire la longueur coupante maximale obtenue lors de l'analyse selon les directions d'usinage.

La condition ci-dessus devient :

$$\varepsilon_c = \frac{h}{K}$$

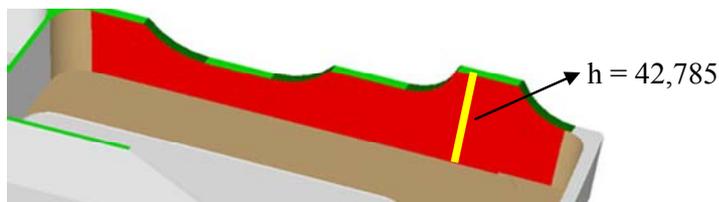


Figure 118. L'épaisseur critique de notre exemple

Le calcul de ε_c donne $\varepsilon_c = 6,11$. En plaçant cette épaisseur dans la courbe et en analysant le cas on obtient que la face est bien une entité mince et elle est alors susceptible d'appartenir à un haut d'aile.

Détermination de l'épaisseur critique des fonds minces

Le gammiste considère comme fond mince les faces fléchissant de 0.01mm sous un effort de 1 kg. La règle métier se concrétise par plusieurs formules selon le cas de la face : fermée ou semi-ouverte. Le calcul de la flèche f_{\max} est présenté le paragraphe C.5.II. Nous présentons le calcul de l'épaisseur théorique selon les différentes natures de la face :

$$\varepsilon_{Th} = \sqrt[4]{\frac{3 \times 10^{-3} \times (D \max)^3}{f \max \times E}} \text{ pour les faces complètement fermées}$$

$$\varepsilon_{th} = \sqrt[4]{\frac{6 \times 10^{-3} \times (\sum LgO)^3}{f \max \times E}} \text{ pour les faces semi-ouvertes}$$

Phase 3 : Epaississement de la face

La troisième phase de l'algorithme sépare la face en deux sous parties : celle non mince et celle potentiellement fond mince ou haut d'aile. En épaississant la face d'étude dans le sens matière, plusieurs cas se présentent.

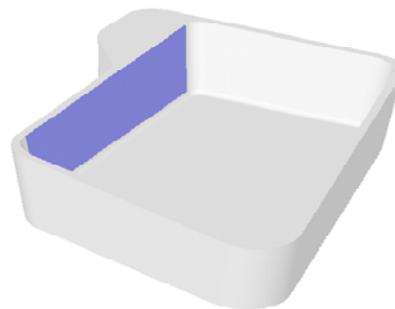


Figure 119. Sélection de la face d'étude

Cette phase se décompose en plusieurs étapes :

- **Décalage de la face** : La face est décalée dans le sens matière de la valeur de l'épaisseur théorique. Trois cas différents se présentent : (a) dans le vide, (b) une partie intersecte la matière et une autre est dans le vide et (c) complètement dans la matière.

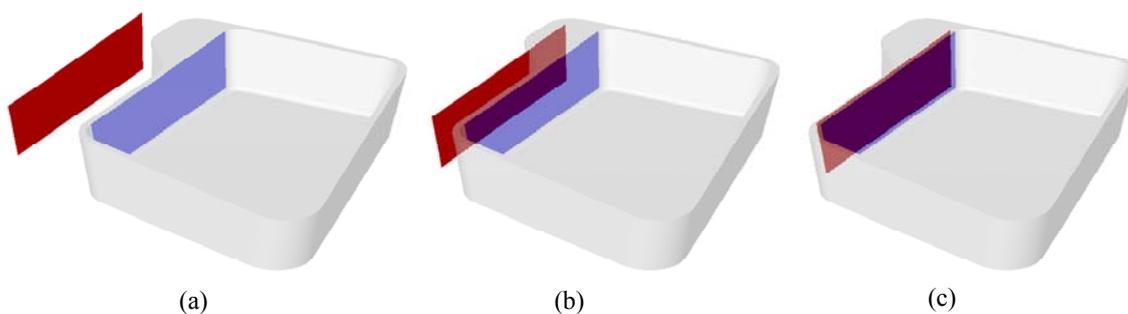


Figure 120. Différents décalages de la face

- **Intersection** : Prenons le cas général (Figure 120b), nous intersectons le décalage avec le corps de la pièce pour obtenir la zone non mince.

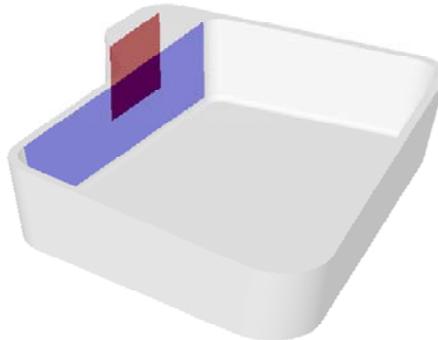


Figure 121. Sélection de la face d'étude

- **Projection / Re décalage** : Nous décalons le résultat de l'intersection dans le sens inverse au premier décalage. Ainsi nous obtenons la partie non mince en rouge sur la face d'origine. Le reste est considéré comme un élément mince.

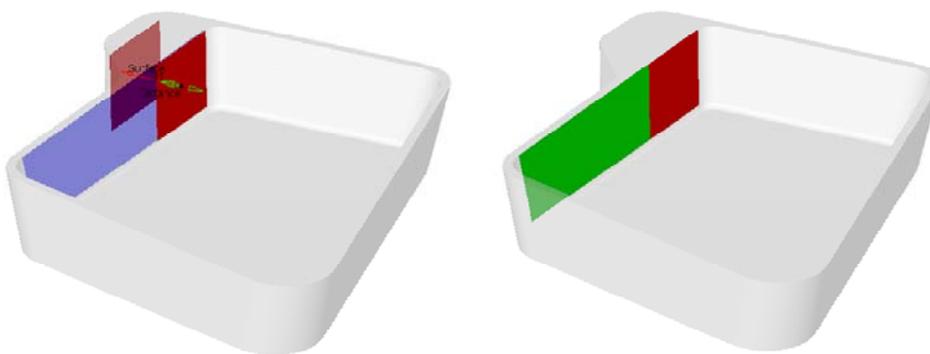


Figure 122. Déclaration de la face verte comme haut d'aile définitif

Nous distinguons les cas suivants en fonction de la comparaison entre l'aire de la partie rouge A_R (non mince) et l'aire de la face d'étude A_F :

- $A_R > 0.8 * A_F$ → la face est déclarée comme non mince,
- $0.2 * A_F < A_R < 0.8 * A_F$ → la face est déclarée comme partiellement mince,
- $A_R < 0.2 * A_F$ → la face est déclarée comme entité mince.

Phase 4 : Prise en compte du posage

Cette phase se réduit à la prise en compte du posage et à fixer les différentes susceptibilités établies précédemment. Ainsi pour notre cas d'étude, ayant obtenu le plan de posage défini figure 123, la face sera typée définitivement comme haut d'aile.

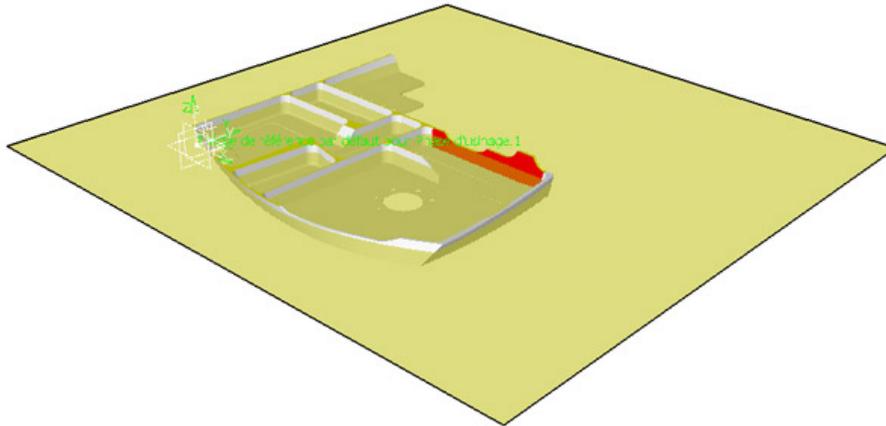


Figure 123. Déclaration de la face rouge comme haut d'aile définitif

IV. Haut d'aile et fond mince simultanément

Pour certaines pièces des ensembles de faces se situant d'un même côté seront considérés comme fond mince et comme haut d'aile pour les faces en opposition.

Dans l'exemple figure 124 ci-dessous, La face B qui comporte plusieurs arêtes courbes TF est déclarée usinable en bout, comme B appartient à l'ensemble mince jaune. Cet ensemble qui risque de fléchir sous la « poussée » de la fraise doit être considéré comme un fond mince. La face F opposée à B n'est pas usinable en bout car elle est totalement masquée, par contre elle est usinable en flanc, de ce point de vue l'ensemble jaune doit être considéré comme un haut d'aile.

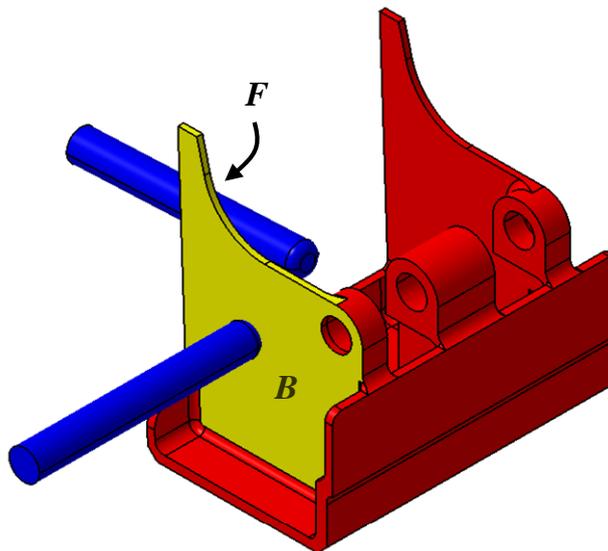


Figure 124. Haut d'aile et fond mince simultanément

V. Difficultés géométriques

Nous allons illustrer sur des exemples simples quelques difficultés géométriques pour déterminer si une face est une entité mince.

Exemple 1

Sur la figure ci-dessous on a représenté 3 géométries de profils de hauts d'ailes. Si le haut d'aile vert est facile à caractériser, il n'en est pas de même pour le bleu et l'orange. Quelle épaisseur doit-on prendre en compte pour le bleu ? Quelle hauteur doit-on prendre en compte pour l'orange ?

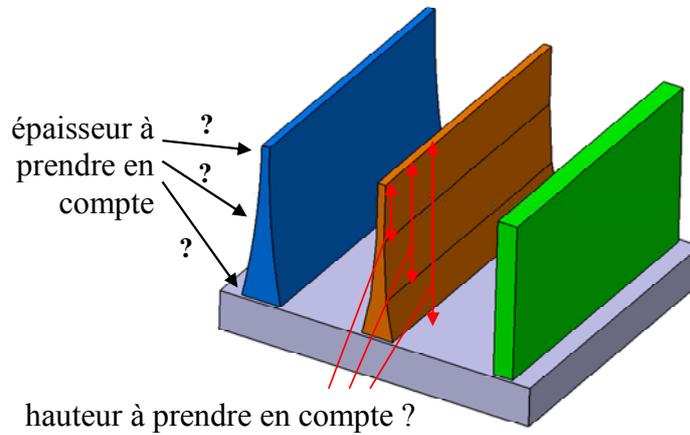


Figure 125. Profil de haut d'aile (exemple 1)

Exemple 2

Pour un profil de haut d'aile comme celui de la figure 126, quelle épaisseur ep et quelle hauteur h faut-il prendre ?

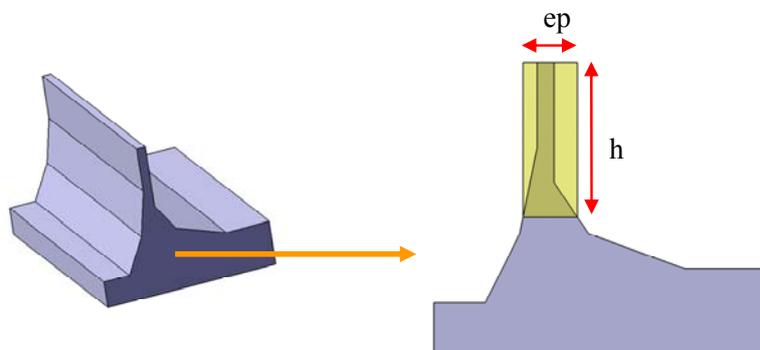


Figure 126. Profil de haut d'aile (exemple 2)

Exemple 3

La figure 127 illustre les problèmes posés dans le cas où le fond n'est pas plat. Le voisinage à étudier doit être pris dans l'espace des normales à la face. Pour la face verte il y a au minimum 9 faces « voisines » et un calcul de distance mini pas forcément simple.

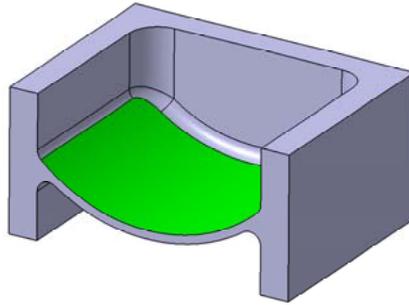


Figure 127. Fond mince quelconque (exemple 3)

6. Conclusion et le modèle final d'USIQUICK

Cette troisième et dernière étape regroupe les différentes EUE (entité d'usinage élémentaire) en des EU (entités d'usinage) de niveau sémantique supérieur. Ce regroupement se fait par une analyse du graphe d'adjacence des faces de la pièce. Nous avons exploité l'enrichissement technologique au niveau des EUE et la typologie des liens entre ces faces afin de regrouper des ensembles de faces susceptibles d'être considérées comme un tout du point de vue d'une opération d'usinage. Cette typologie identifie plusieurs EU : Entité de surfacage (2 axes et demi), Entité Poche (2 axes et demi / 5 axes), Entité multi poches (3 axes), Entité chaîne de flanc externe (2 axes et demi/5 axes) et les Entités Mince.

Nous avons présenté ensuite la problématique détaillée des entités minces (les fonds minces et les hauts d'ailes). Si on se limite aux cas des pièces aéronautiques où les fonds minces sont plans et les hauts d'ailes monolithiques entourés par des faces parallèles, nous pensons que la démarche présentée doit permettre de détecter la plupart de ces entités. Il est cependant fort possible qu'il y ait sur détection - par exemple dans le cas où la hauteur d'élancement aura été majorée - ou sous détection, - par exemple dans certains cas limites. Il semble donc raisonnable d'envisager une visualisation de ces entités et de leurs caractéristiques (épaisseur, valeur de l'élancement ...) afin de fournir à l'opérateur toutes les informations nécessaires à leur validation et éventuellement à la détection d'entités minces non visualisées.

En regroupant ces différentes données nous obtenons le modèle USIQUICK décrit la page suivante.

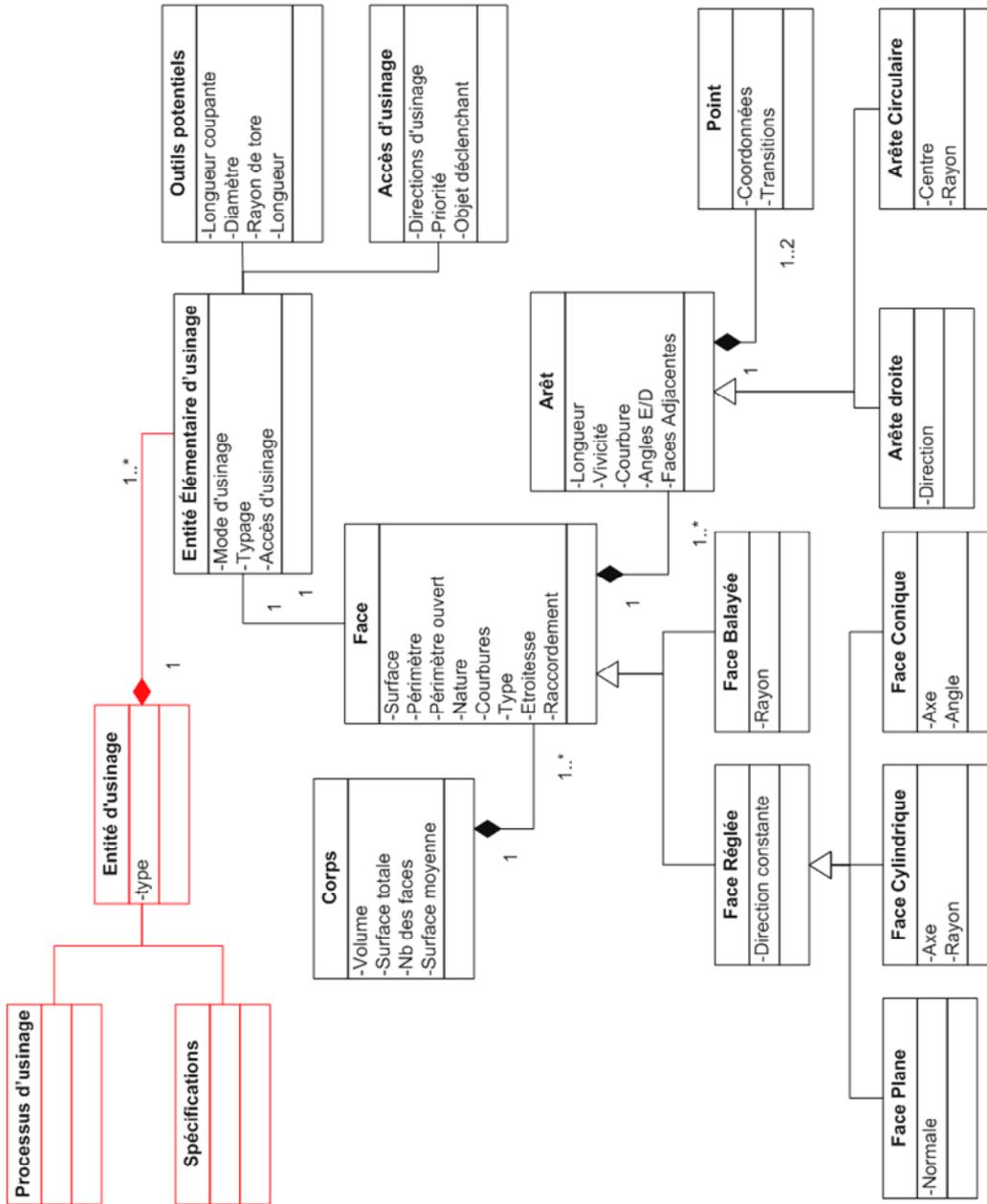


Figure 128. Modèle USIQUICK

D. Interface Préparateur/Usiquick [HAR 06c]

Le transformateur USIQUICK génère des informations utiles au bon déroulement des différents algorithmes. Cependant ces informations ne sont pas toutes essentielles à l'opérateur. Parallèlement, le transformateur calcule les informations dans un ordre qui ne répond pas aux attentes du préparateur et à sa logique. Cette dernière peut être différente suivant le type de pièce et le métier correspondant, par exemple la logique préparateur aéronautique est différente de la logique préparateur automobile : un préparateur automobile n'est pas intéressé autant que le préparateur aéronautique par l'existence des entités minces.

Aussi nous proposons des fiches d'identité des fonctions qu'un système automatique d'aide à la génération de gamme d'usinage doit comporter (voir annexe D). L'ordre de ces fonctions est présenté selon les attentes des préparateurs aéronautiques de l'usine d'Argenteuil de Dassault Aviation. Ces fonctions sont indépendantes, elles peuvent être généralisées à d'autres industries selon un séquençement différent.

I. Dimensions et brut

Ordre	1	
Nom	Dimensions et Brut	
But	Donner une idée de la machine à utiliser	
Module Usiquick	Transformateur / Préparateur	
Entrée	Pièce CAO	
Sortie	Largeur, longueur et hauteur maximale	

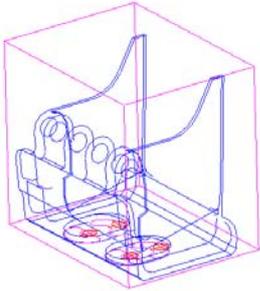


Figure 129. Brut et dimensions de la pièce

Cette fonction exprime les dimensions approximatives de la pièce mécanique et propose un premier brut ayant ces dimensions.

Tableau 11. Carte d'identité de la fonction 'Brut et Dimensions'

La première question posée par un préparateur concerne les dimensions approximatives de la pièce. En assimilant ces dimensions à un brut primitif, le préparateur vérifie la compatibilité de la pièce avec l'outillage machine dans l'atelier. Au cas où la pièce n'est pas compatible, le préparateur renvoie la pièce à un autre atelier ou vers les services de sous-traitance. Cette fonction est aussi utile pour le choix de la tôle. La connaissance des dimensions du brut d'une pièce doit permettre un regroupement de pièces différentes dans des familles.

II. Reconnaissance Géométrique

Ordre	2	
Nom	Reconnaissance géométrique	
But	Séparer visuellement les différents types de faces	
Module Usiquick	Transformateur	
Entrée	Pièce CAO	
Sortie	Modèle CAO +	

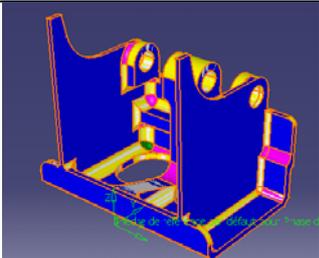


Figure 130. Reconnaissance géométrique

Cette fonction type les différentes faces suivant leurs natures respectives: faces planes, cylindriques, réglées, balayées, coniques et non spécifiées.

Tableau 12. Carte d'identité de la fonction 'Reconnaissance géométrique'

Cette fonction permet d'éviter les erreurs visuelles d'interprétation quant aux faces galbées (faces de forme) qui souvent correspondent à la forme extérieure de l'avion. L'existence d'un module permettant d'indiquer de manière précise sur la pièce des demandes de modifications du bureau de production ainsi que l'existence d'un tableau pour les valeurs des rayons (un pour les fillets et un pour les cylindres débouchants) sont intéressantes à ce stade de l'étude.

III .Outils potentiels

Ordre	3	
Nom	Outils potentiels	
But	Donner une idée des plages d'outils potentielles	
Module USIQUICK	Transformateur	
Entrée	Tableau des rayons (Raccordements + Cylindres)	
Sortie	Référence de l'outil	

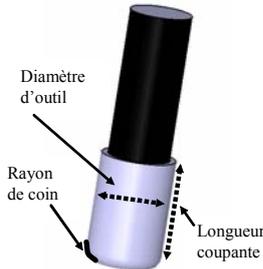


Figure 131. Brut et dimensions de la pièce

Suite à une analyse de la pièce, cette fonction fournit les dimensions potentielles des outils coupants, à savoir : longueur coupante, diamètre et rayon de coin.

Tableau 13. Carte d'identité de la fonction 'Outils Potentiels'

La sélection des outils d'usinage résulte essentiellement de l'étude de deux critères : La matière (aluminium, titane...) et la géométrie de la pièce. Une fois un premier outil potentiel sélectionné, nous pourrions procéder par itérations jusqu'à l'obtention de l'outil optimal. Les préparateurs essaient de terminer les faces usinables sans changement d'outil pour ne pas marquer les pièces. L'usinage de 95% d'une face avec un outil est satisfaisant. La longueur coupante de l'outil ne doit pas être trop importante. Un grand rapport longueur/diamètre entraîne une vibration de l'outil.

IV .Entités caractéristiques

Ordre	4	
Nom	Entités caractéristiques	
But	Spécifier les zones critiques	
Module Usiquick	Transformateur	
Entrée	Modèle Usiquick	
Sortie	Entités caractéristiques	

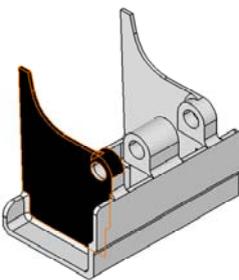


Figure 132. Entités caractéristiques

Suite à l'application de plusieurs algorithmes de calculs, le transformateur établit une liste des zones critiques nécessitant un traitement spécifique, ce sont: les hauts d'ailes et les fonds minces.

Tableau 14. Carte d'identité de la fonction 'Entités caractéristiques'

Certaines entités doivent être finies lors de la phase d'ébauche. Ces entités n'apparaissent pas clairement à l'opérateur ce qui induit des erreurs tardives dans la génération de gamme.

V. Typage

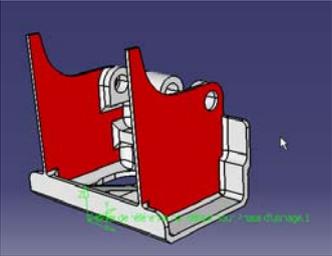
Ordre	5				
Nom	Typage				
But	Estimer	sans	calcul		
	d'usinabilité	le	mode		
		d'usinage	des faces		
Module Usiquick	Transformateur				
Entrée	Modèle Usiquick / Règles				
Sortie	Attribut typage				
<p>A partir de règles métiers, ce module détermine – sans calcul d'usinabilité – le mode d'usinage des faces. Le résultat est montré visuellement par des couleurs différentes.</p>					

Figure 133. Typage

Tableau 15. Carte d'identité de la fonction 'Typage'

Par le biais de trois familles de règles (intrinsèques, adjacences, lointaines) le logiciel fournit au préparateur une certaine propagation des modes d'usinage pour la finition de la pièce.

VI. Directions d'usinage

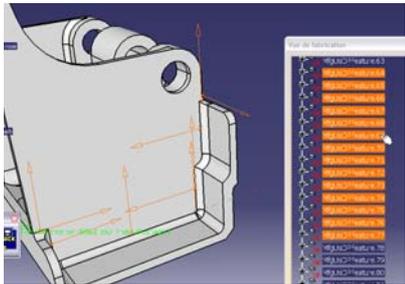
Ordre	6				
Nom	Directions d'usinage				
But	Extraction	des	directions		
	d'usinage				
Module Usiquick	Transformateur				
Entrée	Attributs des arêtes				
Sortie	Directions	d'usinage	en		
		groupes de priorités			
<p>Par étude des arêtes limitant la face étudiée et de plusieurs critères géométriques, ce module calcule les directions d'usinage en flanc de celle-ci.</p>					

Figure 134. Direction d'usinage

Tableau 16. Carte d'identité de la fonction 'Direction d'usinage'

L'information des directions d'usinage permet à l'opérateur d'imaginer la trajectoire outil potentielle à la réalisation de la face. Ces directions sont surtout utiles quant à l'étude de l'usinabilité en flanc des faces planes. Ces dernières posent des difficultés aux préparateurs : Parmi une infinité de directions possibles pour usiner une surface plane, lesquelles sont les plus optimales ?

VII. Usinabilité UEB – UEF

Ordre	7
Nom	Calcul d'usinabilité
But	Calculer les zones non usinables en bout/flanc
Module Usiquick	Transformateur
Entrée	Face + Directions + Mode d'usage
Sortie	Sous Face non usinable

Cette fonction visualise pour chaque face la zone usinée en bout ou en flanc ou autre par une fraise de rayon nul. Elle évalue donc l'usinabilité d'une face. Pour l'usinage en flanc on utilise les directions d'usinage établies préalablement.

Tableau 17. Carte d'identité de la fonction 'Outils Potentiels'

Quand le préparateur raisonne au niveau d'une face F, il se demande quel est le mode d'usinage pour la meilleure réalisation de F : Usinage en bout ? Usinage en Flanc ? Usinage en Balayage ?

Ainsi, cette fonction lui offre une réponse visuelle, par exemple « Si j'opte pour l'usinage en bout, j'aurai cette zone non usinable, tandis qu'avec l'usinage en flanc elle est complètement usinable ».

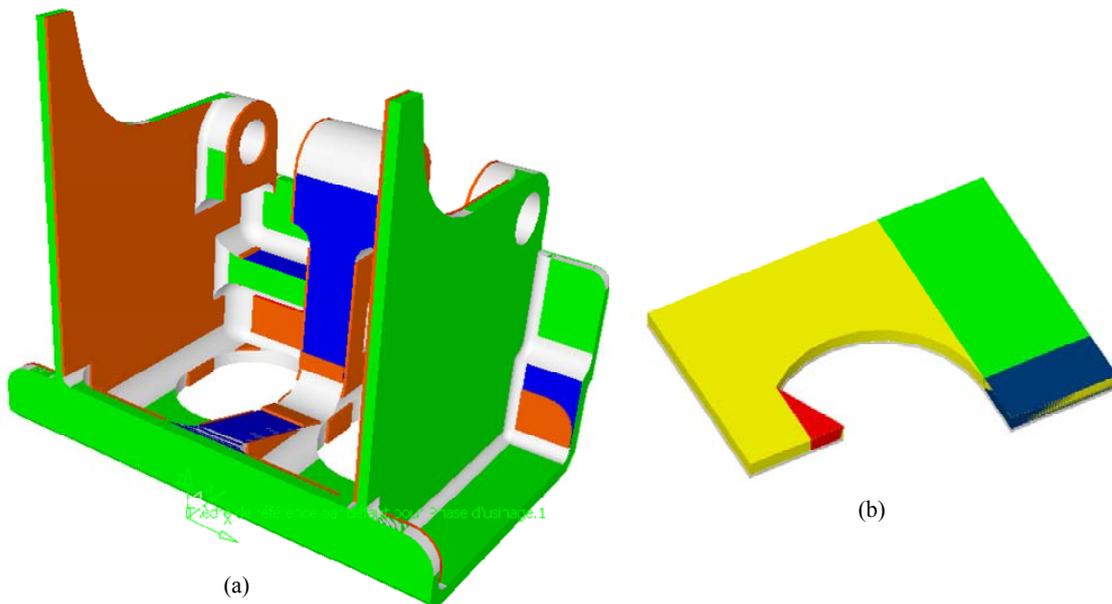


Figure 135. (a) Usinabilité en bout de la pièce (b) Usinabilité en flanc de la pièce

VIII. Proposition de posage

Ordre	8
Nom	Proposition de Posage
But	Définir un premier posage
Module Usiquick	Transformateur / Préparateur
Entrée	Les faces plane + Leur usinabilité en bout
Sortie	Le plan de posage
Proposition d'un premier posage par rapport à l'usinage en bout. En calculant la plus grande surface potentiellement usinée suivant une même direction.	

Tableau 18. Carte d'identité de la fonction 'Posage'

Les préparateurs confirment que généralement c'est la règle ci-dessus qui détermine le premier posage (le préparateur a cependant toutes latitudes pour faire un autre choix).

Pourtant il y a des exceptions, par exemple lorsqu'on désire qu'une face d'appui ou de référence soit faite avec une qualité optimale. Dans ce cas, on pourra accepter qu'une face plane soit usinée en balayage (non de référence). La possibilité de sélectionner des faces de référence par l'opérateur est essentielle (pour le respect d'une qualité exigée). Les opérateurs utilisent rarement cette possibilité, ce qui conduit à des pièces de mauvaise qualité pour lesquelles il faut revoir la gamme.

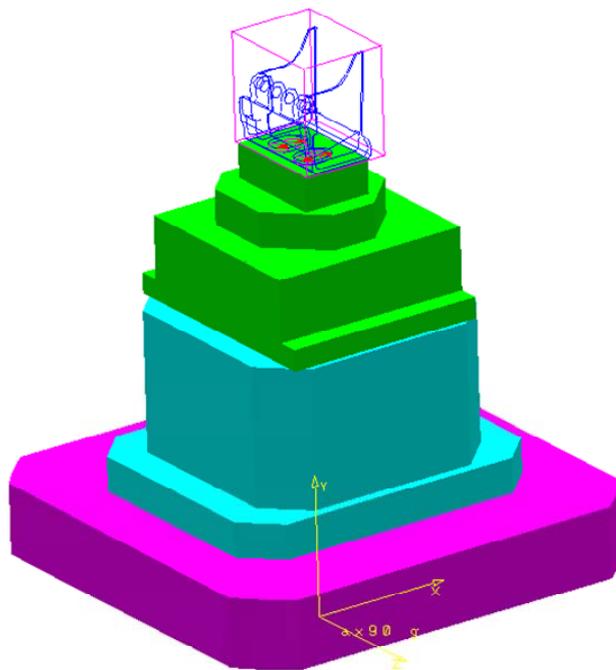


Figure 136. Proposition de posage

IX. Accessibilité machine

Ordre	9
Nom	Accessibilité machine
But	Vérifier la cinématique machine
Module Usiquick	Transformateur / Préparateur
Entrée	Directions d'usinage + Machine
Sortie	Directions filtrées
Pour une orientation de la sphère d'accessibilité de la machine, cette fonction sépare en 2 groupes les directions d'usinage interne à la sphère et les autres.	

Tableau 19. Carte d'identité de la fonction 'Accessibilité Machine'

Bien souvent les directions d'usinage proposées peuvent contraindre la cinématique machine et dépasser les capacités rationnelles de cette dernière. Par exemple, pour le posage (Figure 136) les directions d'usinage ne vérifient pas les conditions cinématiques de la machine (Figure 137).

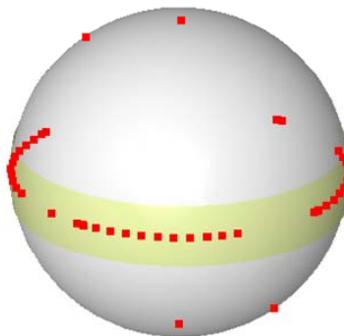


Figure 137. Accessibilité Machine

Le préparateur cherche à optimiser ses posages par rapport à une combinaison des directions d'usinage et de l'accessibilité. [CAP 05] définit des étapes de balançage qui proposent plusieurs solutions pour le posage suite à la prise en compte de la cinématique machine.

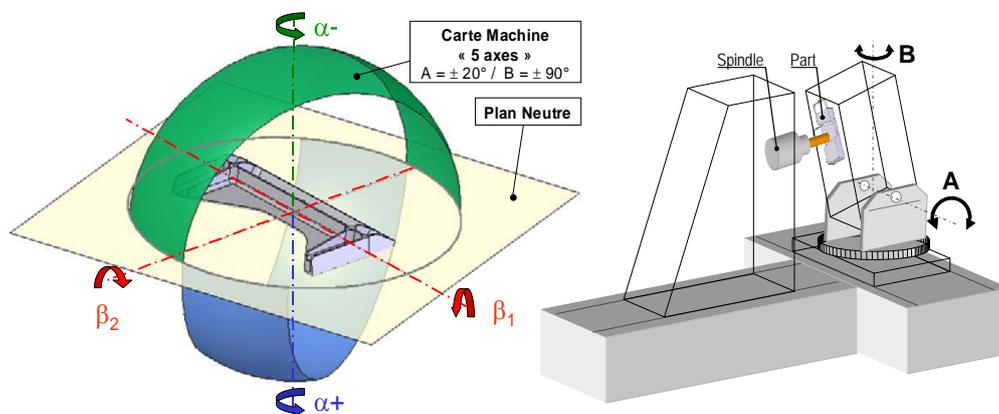


Figure 138. Carte d'accessibilité [CAP 05]

X. Enchaînements

Ordre	10	
Nom	Enchaînements de face	
But	Spécification des faces enchaînables	
Module Usiquick	Transformateur	
Entrée	Faces + Mode d'usinage	
Sortie	Regroupement de faces	

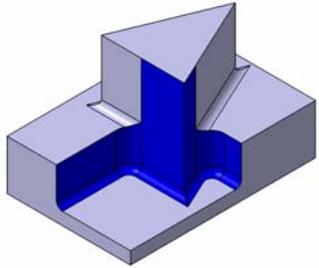


Figure 139. Enchaînements

Établir des listes d'enchaînements pour les faces usinables simultanément.

Tableau 20. Carte d'identité de la fonction 'Enchaînements'

Il s'agit de considérer les attributs d'arêtes et les résultats des calculs d'usinabilité afin de regrouper plusieurs faces ensemble, elles seront usinées dans la même trajectoire d'usinage (donc avec le même outil). Un raisonnement s'appuyant sur la recherche des chemins dans les graphes est utilisé (CHAPITRE 2C). A partir de la liste des enchaînements possibles de faces déterminées dans un premier temps sans informations de posages, le préparateur choisit dans cette liste les enchaînements à considérer en tenant compte des contraintes de posages.

XI. Mise en panoplies

Ordre	11	
Nom	Mise en panoplies	
But	Proposer un usinage pièces multiples	
Module Usiquick	Préparateur	
Entrée	Posage + Brut	
Sortie	Panoplies	

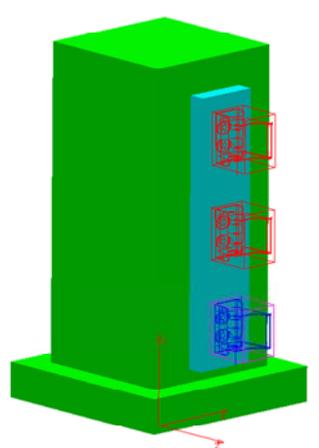


Figure 140. Mise en panoplies

Suite à la prise en compte du posage et des débits standard, nous étudions la possibilité d'usiner plusieurs pièces selon la même configuration.

Tableau 21. Carte d'identité de la fonction 'Mise en Panoplies'

XII. Cassage d'angle

Ordre	12
Nom	Cassage d'angle
But	Optimisation de teneur en fatigue et de la sécurité
Module Usiquick	Transformateur
Entrée	Longueur et Vivacité des arêtes
Sortie	Attribut Cassage
<p>Cette fonction réduit les vivicités ouvertes pour une meilleure tenue en fatigue et pour la sécurité lors des manipulations.</p>	

Tableau 22. Carte d'identité de la fonction 'Justification'



Figure 141. Cassage d'angle

Conclusion

Cette partie a pour objet l'interface Préparateur/USIQUICK. Cette dernière s'attache à organiser les résultats de la transformation de la pièce dans un ordre logique préparateur. Nous avons proposé des « fiches d'identité des fonctions » qu'un système automatique d'aide à la génération de gamme d'usinage doit à notre avis accomplir.

Certaines fonctions sont mises en œuvre dans le chapitre suivant, ainsi qu'une validation industrielle.

Conclusion générale du chapitre 2

Dans ce chapitre nous avons présenté le Transformateur et ses trois étapes de transformation : la caractérisation géométrique, l'enrichissement technologique et les graphes d'enchaînement. Une quatrième étape présente la séquence logique selon laquelle un préparateur humain aborde l'analyse, en mobilisant tour à tour différents aspects du modèle enrichi.

La première étape de caractérisation géométrique enrichit le modèle B-Rep de la pièce en vue de réaliser les calculs technologiques élémentaires dans l'étape suivante. Ces attributs conditionnent les résultats et les choix à déterminer ultérieurement. Les éléments (corps, face, arête, point) sont dotés de différents attributs. Ces derniers permettent de séparer les éléments en plusieurs groupes. Chaque groupe induit un traitement différent. Ainsi les faces sont de plusieurs natures : Ouvertes, Fermées, Semi-Ouvertes. La vivacité des arêtes est un critère primordial pour l'extraction des directions d'usinage.

L'enrichissement technologique consiste à associer à chaque face du modèle géométrique enrichi au moins un processus d'usinage de finition, validé et indépendant des autres processus. Ce second enrichissement se déroule en plusieurs phases (directions d'usinage, usinabilité, outils capables, typage).

- a) La première (accès d'usinage) détermine les directions d'axes de fraises pouvant contribuer à l'usinage, indépendamment des obstacles. Différents cas sont envisagés, selon les types de face mais aussi d'usinages.
- b) La seconde (usinabilité) vérifie l'accessibilité effective des faces pour les accès candidats. Les notions de masque (dues à des obstacles) et d'épsi-masques (dues à l'outil) sont utilisées pour déterminer d'éventuelles zones non usinables.
- c) La troisième (outils capables) a pour but de qualifier un ensemble non vide d'outils au regard de leur aptitude dimensionnelle à usiner la face, sans interférence avec le reste de la pièce.
- d) La quatrième (typage) fait la synthèse des précédentes et permet le typage de la face d'un point de vue usinage, selon sa géométrie, son accessibilité préalablement vérifiée, et éventuellement son voisinage.

L'aboutissement de l'enrichissement technologique pour une face lui confère le statut d'entité d'usinage élémentaire.

La troisième étape a pour but de regrouper les faces des pièces dans des entités de haut niveau type, poche, flanc externe, filets... L'approche proposée s'appuie sur le traitement du graphe pièce enrichi et aboutit à la mise en couleur des faces de la pièce sur le 3D afin de faciliter la lecture par le gammiste. On exploite l'enrichissement technologique au niveau des EUE et la typologie des liens entre les faces. La méthode de détection des entités minces fait l'objet d'une section spécifique.

La quatrième étape de ce chapitre replace les algorithmes précédents dans le contexte du

préparateur. Le dialogue homme-machine fait pleinement partie de l'approche USIQUICK, afin de laisser au préparateur la possibilité de prendre des décisions importantes et de lui donner visuellement tous les résultats des analyses géométriques. Par exemple, le préparateur peut tester l'usinage d'une face en bout ou en flanc et visualiser les parties éventuellement non accessibles.

Ainsi, au travers de ce chapitre, nous avons défini des fonctions CAPP qui à partir d'une géométrie BREP CAO nous conduit à une géométrie comportant un ensemble d'informations de fabrication de la pièce.

Chapitre 3

Le Transformateur : Mise en œuvre.

A. Architecture CAA du Logiciel

B. Le Prototype

C. Confrontation Industrielle

Introduction

Ce chapitre présente la réalisation des algorithmes avancés dans le chapitre précédent. La mise en œuvre du prototype a été menée conjointement avec les différents partenaires du projet USIQUICK. Le prototype fut présenté le 12 décembre 2006 durant la journée de clôture du projet et les différentes vidéos des résultats sont présentés sur www.usiquick.com. Nous organisons cette partie du manuscrit en trois sections différentes : l'architecture du logiciel, le prototype et la confrontation industrielle.

En premier nous détaillons l'architecture CAA du prototype et l'environnement DS (Dassault Systèmes) du développement. Ce dernier dote le prototype d'une ouverture à deux directions : (1) en ouvrant l'accès aux différents espaces de travail du puissant logiciel de CFAO CATIA V5 ® et (2) avec la possibilité de programmation collaboratif à plusieurs partenaires au sein du même environnement de travail.

Suite à la description de l'architecture CAA nous présentons le prototype USIQUICK. Ce logiciel à but pré-compétitif s'intègre parfaitement dans CATIA V5 ® et comporte un ensemble de fonctions pour la compréhension des pièces mécaniques. Nous montrons les différentes fonctions du logiciel en mode 'tutorial' qui explique parallèlement comment utiliser ces nouvelles fonctionnalités.

Au final nous exposons une confrontation industrielle menée conjointement avec Dassault Aviation pour tester la validité du transformateur à l'état du développement en décembre 2006. Cette validation industrielle montre les apports du Transformateur pour la compréhension de la pièce par l'opérateur et la proposition de gamme.

L'opérateur met en évidence et commente les étapes pour chacune de ces pièces:

- Reconnaissance géométrique et identification des surfaces de raccordement
- Extraction des directions d'usinage
- Calculs de fabricabilité en bout et en flanc
- Proposition d'un premier plan de posage

La confrontation illustre la capacité du Transformateur à mettre en évidence l'usinabilité des faces et les difficultés éventuelles d'usinage. La visualisation 3D des résultats de la caractérisation géométrique permet d'identifier facilement les faces "difficiles" souvent oubliées lors d'une analyse visuelle classique. Sans le transformateur USIQUICK, l'identification de ces faces "difficiles" est possible uniquement lors de l'élaboration de la gamme détaillée voire au moment du calcul de trajet outil. Ne pas identifier très tôt dans le processus d'élaboration de la gamme implique une remise en cause majeure de la gamme, avec pour conséquence une forte perte de temps car il faut souvent reprendre tout ou partie de la gamme complète.

Cette partie est le résultat du travail élaboré avec messieurs Bernard GOEMAERE, Jean-Marc GRILLET et Christian ROUCHON.

A. Architecture CAA du Logiciel

La mise en œuvre du transformateur est menée sur la plateforme USIQUICK commune aux différents partenaires du projet. La coordination sur le développement menée par Dassault Systèmes profita de la puissance que présentait l'architecture CAA (Common Application Architecture) : l'ensemble des services d'accès au modèle de données, à l'expérience utilisateur, à la gestion du savoir-faire et à la géométrie, ont été mis ainsi à disposition de l'ensemble des partenaires.

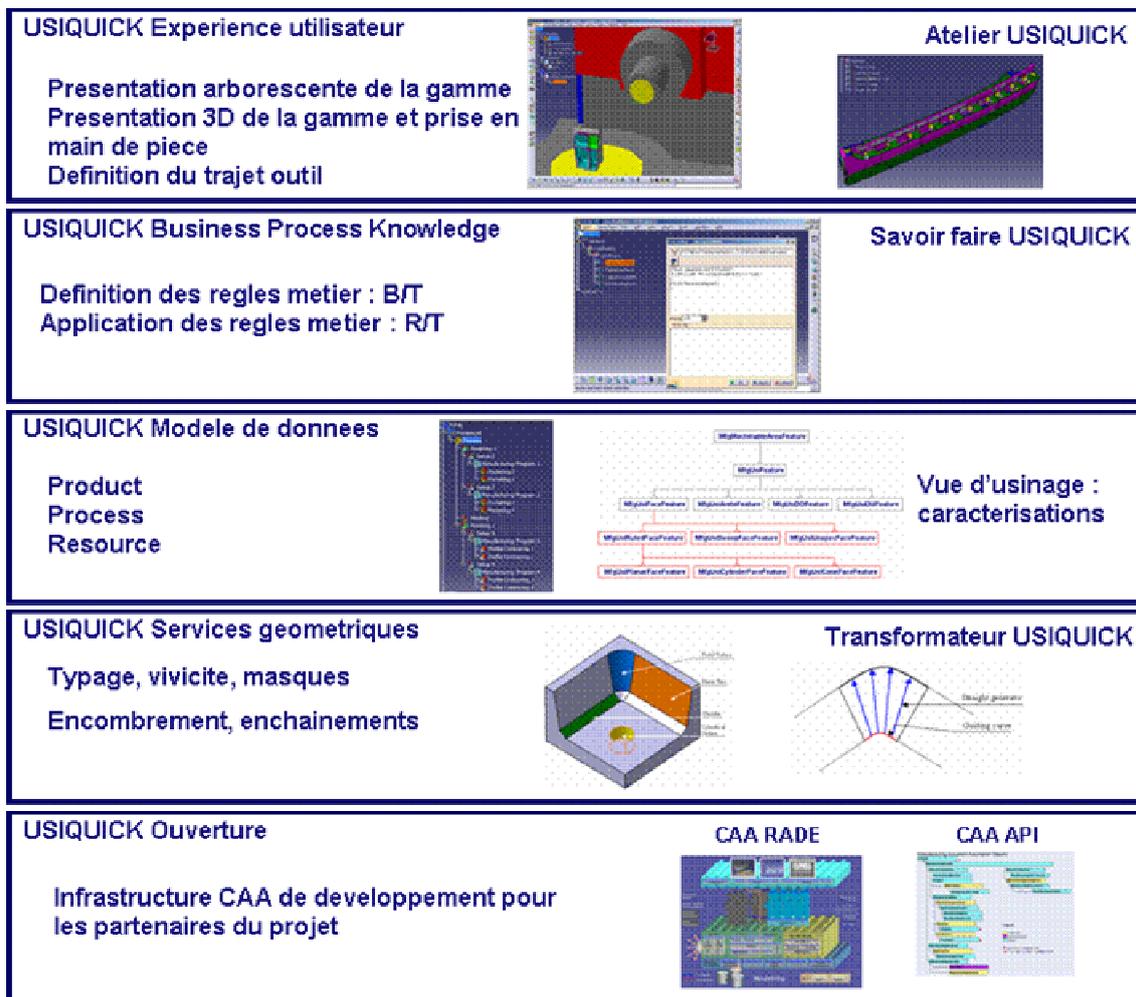


Figure 142. Les 5 ressources de l'architecture USIQUICK

L'architecture globale du logiciel se voulait accessible aux différents partenaires, en offrant une ouverture à plusieurs niveaux pour l'utilisateur. Ainsi, l'architecture se compose de plusieurs niveaux montrés figure 142. Deux niveaux caractérisent la structure logicielle : le niveau RUNTIME de calcul où les données ne sont pas sauvegardées ni accessibles et le niveau FEATURE où les différents résultats sont sauvegardés dans le modèle USIQUICK. Ce dernier niveau est exploitable en trois manières distinctes par l'utilisateur : Vue d'usage, Savoir Faire et Atelier.

Dans la suite nous détaillons l'infrastructure CAA de base et la transformation géométrique ainsi que l'exploitation des résultats de cette dernière. Cette exploitation consiste en la vue d'usage par le biais du modèle USIQUICK, le savoir faire par l'intermédiaire des règles métiers et l'atelier USIQUICK qui offre une vue 3D de la pièce traitée.

I. L'infrastructure CAA de base

L'architecture CAA présente plusieurs avantages et quelques inconvénients pour le développement du logiciel USIQUICK.

En termes d'avantages, l'ouverture sur les différents domaines de l'industrialisation (Conception, Gamme, Fabrication, Simulation) du logiciel CATIA V5 est d'une importance majeure. Les différents partenaires partagent une plateforme commune ce qui est cohérent pour obtenir le modèle unique et fédéré USIQUICK. L'ensemble des domaines que couvre le CAA présente un autre avantage : plusieurs API qui relèvent des domaines géométriques et mécaniques sont à disposition pour re-utilisation. Au niveau géométrique, particulièrement concernant le transformateur, la technologie V5 donne la possibilité de représenter mathématiquement les géométries communes et offre une possibilité pour créer les nouvelles présentations.

En termes de désavantages, le CAA nécessitait une formation longue et spécifique. L'intégration au sein du protocole de communication BACKBONE le rendant universel, mais en même temps la technique de compilation nécessite une manipulation assez manuelle parfois.

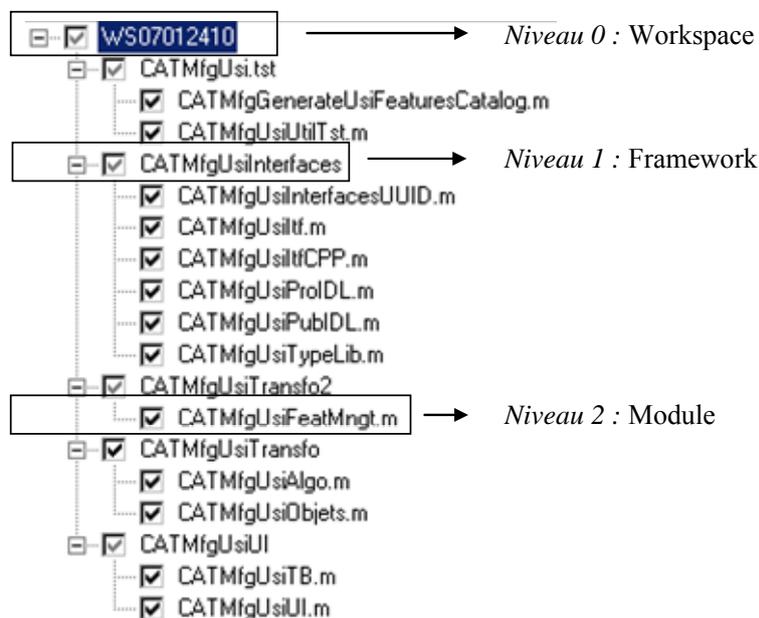


Figure 143. Workspace USIQUICK du 24 Janvier 2007

Le CAA se base sur le langage de programmation C++. La programmation CAA profite du logiciel Microsoft Visual C++, qui offre un espace de travail visuel. Ainsi, le logiciel Microsoft Visual C++ se personnalise en rajoutant les fonctions CAA au domaine de travail habituel. La programmation CAA se fait dans un 'workspace' séparé en plusieurs 'framework', eux-mêmes séparés en plusieurs 'module'. La figure 143 présente la dernière version du logiciel stable (utilisée pour l'écriture de ce manuscrit). Cette version date du 24 Janvier 2007. Les différents partenaires USIQUICK

programmaient dans le même 'Workspace' (**WS07012410**). La séparation se fait au niveau des frameworks (**CATMfgUsi.tst**, **CATMfgUsiInterfaces**, **CATMfgUsiTransfo2**, **CATMfgUsiTranso** et **CATMfgUsiUI**) où chaque partenaire a son espace dédié. Le framework **CATMfgUsiTranso** est celui de la mise en œuvre du transformateur. Le framework commun **CATMfgUsiTransfo2** entre le CRAN et Dassault Systèmes est établi pour transmettre au niveau FEATURE les informations provenant du niveau RUNTIME.

II. La transformation géométrique

Les services géométriques proposés par le CRAN se placent à l'aval et à l'amont de services de structure gérés par Dassault Systèmes. Nous avons organisé le travail de la manière suivante (Figure 144) :

- Dassault Systèmes traite la pièce et fournit comme résultat le modèle géométrique B-Rep,
- Le CRAN lance les différentes phases du transformateur sur le modèle B-Rep fourni par DS et sauvegarde les différents résultats dans un modèle temporaire,
- Dassault Systèmes récupère les résultats et met à jour le modèle USIQUICK.

Les données CRAN étant sauvegardées dans la structure CATIA, leur utilisation est possible à travers les règles métiers. USIQUICK bénéficie d'une exploitation des résultats de trois manières distinctes :

1. **Prise en main virtuelle de la pièce.** Le transformateur propose au préparateur une représentation 3D colorée de la pièce lui permettant d'identifier les difficultés d'usinage et d'exploiter les résultats visuellement.
2. **Vue de fabrication.** Le transformateur propose au préparateur des outils de revue de l'usinabilité de la pièce en séparant la visualisation des faces caractéristiques telles les rayons de raccordements ou les surfaces balayées par exemple.
3. **Ouverture aux règles métiers.** Le transformateur propose au préparateur un système ouvert pour l'intégration aisée du savoir faire industrialisation.

Dassault Systèmes

DS traite la pièce et fournit comme résultat le modèle géométrique B-Rep.



CRAN

Le CRAN lance les différentes phases du transformateur sur le modèle B-Rep fourni par DS et sauvegarde les différents résultats dans un modèle temporaire.

Les résultat visuels (Directions, Masques) sont créés dans l'arborescence CATIA et cachés.

LE TRANSFORMATEUR D'USIQUICK

Phase 1: RECONNAISSANCE GÉOMÉTRIQUE

Géométrie des faces (Plane, Cylindrique, Réglée, Balayée...)
 Géométrie des arêtes (Linéaire, Circulaire...)
 Attributs traditionnels (Surface, Normale, ...)
 Attributs spécifiques (Vivacité, Adjacence, Nb d'ilôts, Nb de puits...)
 Les features de conceptions (Fillet, Chamfrein...)

Phase 2: FONCTIONS D'USINAGE

Directions d'usinages - Usinabilité - Entités minces - Enchaînements - Outils capables - Premier plan de posage

Usinabilité en Bout (MT1)

Les zones non usinables de la pièces quand le mode d'usinage en bout est sélectionné.

Usinabilité en Flanc (MT2)

Identification des directions d'usinage et calcul des zones non usinables de la pièces quand le mode d'usinage en flanc est sélectionné.

Dassault Systèmes

DS récupère les informations utiles et remplit le modèle FEATURE D'USIQUICK.

Les résultats sont mis à disposition de trois manières différentes.

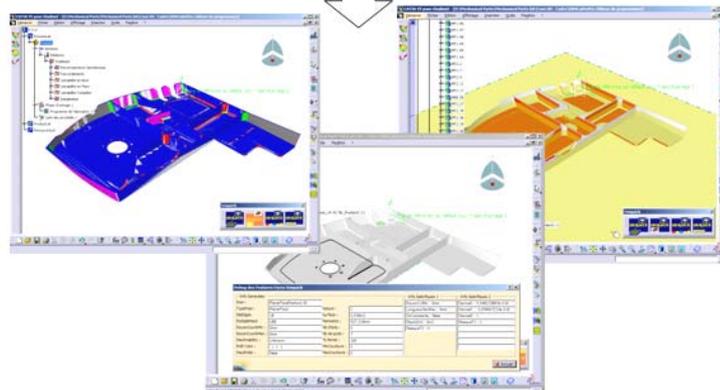


Figure 144. Localisation des services géométriques du CRAN

B. Le Prototype

Dans cette partie nous montrons les différentes fonctions du logiciel en mode 'tutorial', on explique ainsi parallèlement comment utiliser ces fonctionnalités USIQUICK, elles s'intègrent dans l'atelier '**Machining**' de CATIA V5 ®.

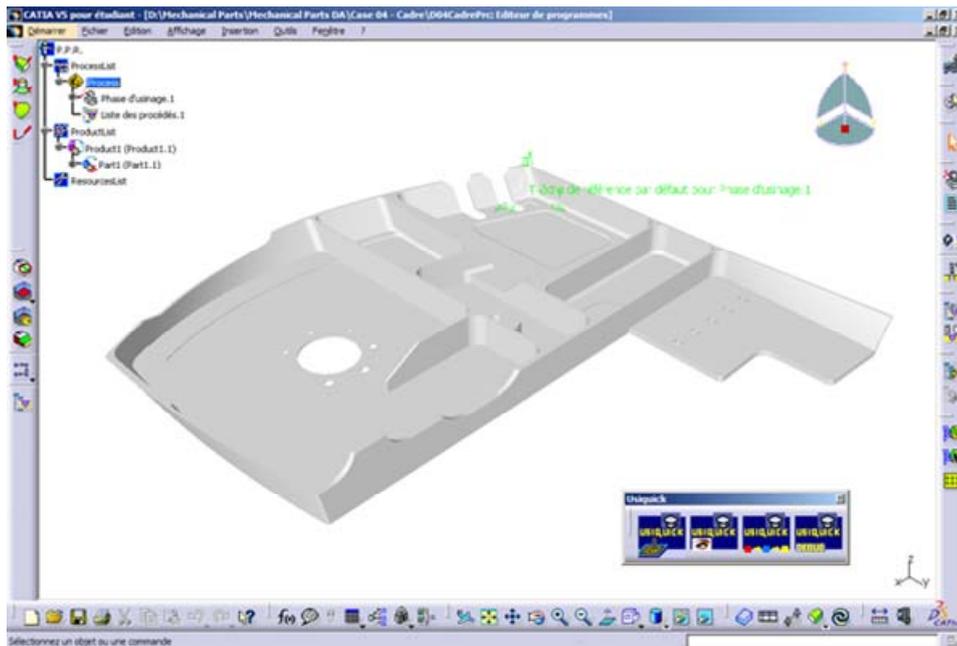


Figure 145. Atelier 'Machining' (module 'Fabrication par NC')

Ainsi, en ouvrant une pièce mécanique dans l'atelier 'Machining' (Figure 145) le toolbar d'USIQUICK (Figure 146) apparaît. Ce dernier comporte un bouton de lancement du transformateur, et trois boutons pour l'exploitation des résultats de manières différentes.

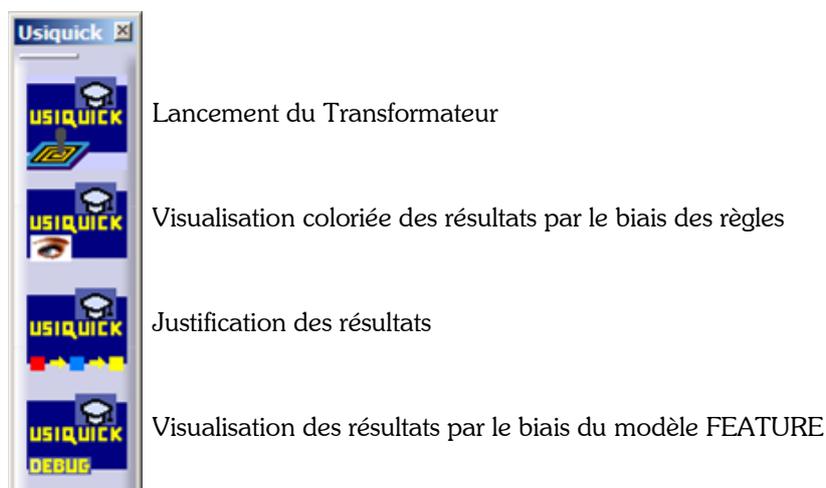


Figure 146. Toolbar USIQUICK

Mise en Oeuvre du transformateur

Pour lancer le transformateur, nous sélectionnons le premier bouton. Une boîte de dialogue apparaît qui demande la sélection de la pièce à 'transformer' (Figure 147). Nous sélectionnons la pièce et actionnons le transformateur.

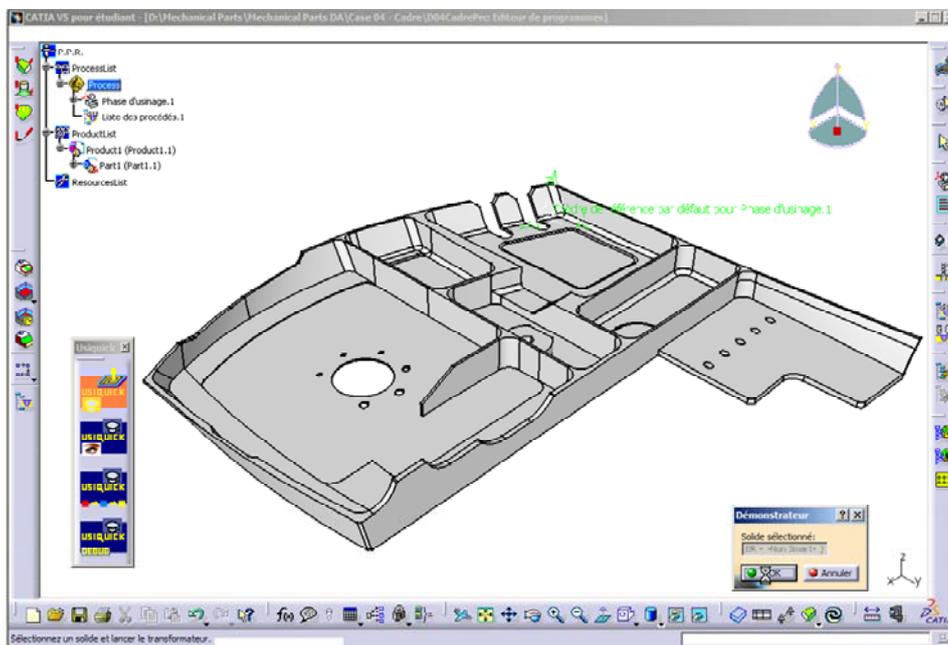


Figure 147. Lancement du transformateur et premier résultat

Pour la pièce *Cadre* (ci-dessus) nous obtenons les résultats dans l'atelier 3D CATIA (Figure 148) après 81 secondes (temps moyen de traitement de 59 secondes, temps constaté sur 21 pièces aéronautiques différentes). Ce résultat est exploitable de différentes manières : Règles knowledge, Vue d'usinage, modèle Feature, Atelier 3D, Justifications ... Les plans de références ainsi que les zones non usinables étant créés et visibles au sein de l'atelier CATIA, nous utilisons la fonction 'Cacher/Montrer' pour une meilleure visibilité des résultats.

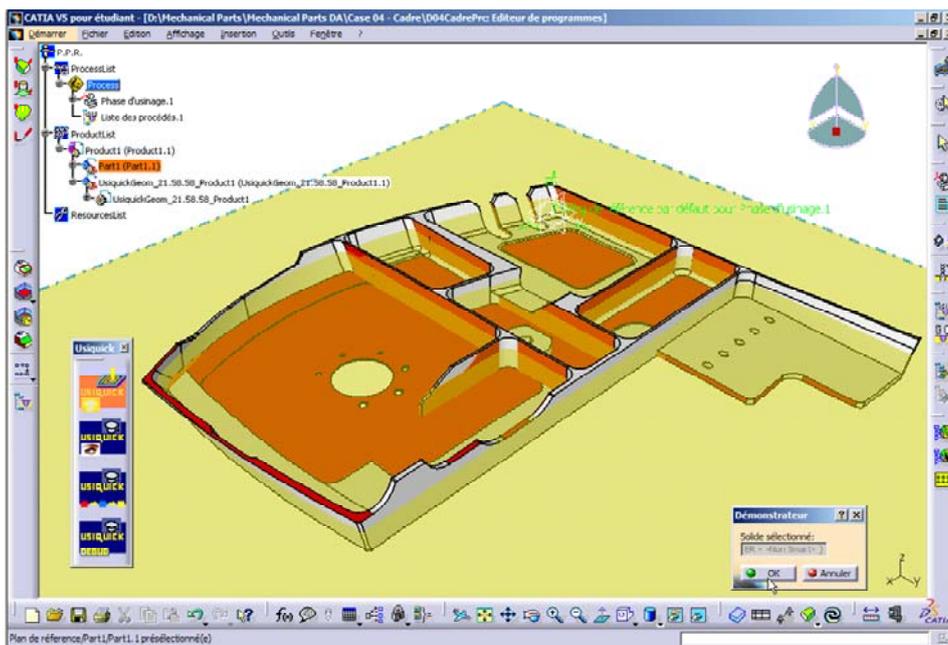


Figure 148. Premier résultat dans l'atelier CATIA

I. Exploitation des résultats par le biais des règles knowledge

Les résultats des traitements géométriques et technologiques sont sauvegardés dans le catalogue de feature CATIA. Ainsi, nous pouvons exploiter les résultats par le biais de l'interface 'Business Process Knowledge'. Il suffit de définir des règles simples qui colorient les résultats selon notre choix.

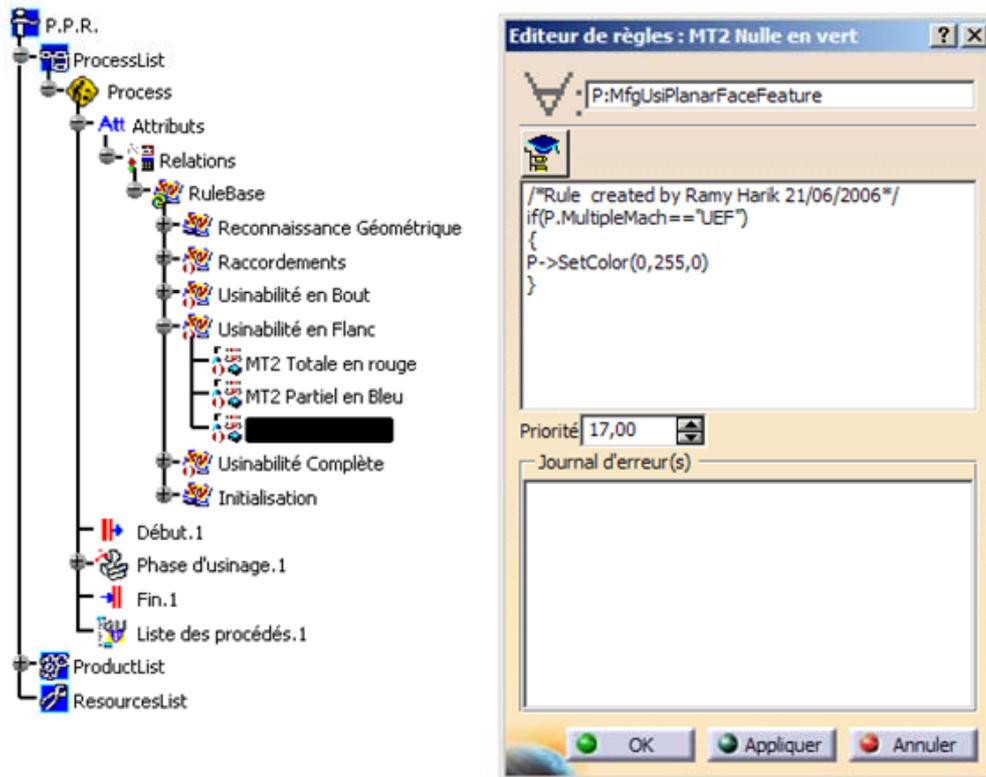


Figure 149. Base de règle (à gauche), exemple d'une règle métier (à droite)

Par exemple la règle :

```

P:MfgUsiPlanarFaceFeature
/*Rule created by Ramy Harik 21/06/2006*/
if (P.MultipleMach=="UEF")
{
P->SetColor (0,255,0)
}

```

demande à vérifier si la valeur de l'attribut *MultipleMach* portée par l'élément *P* (tel que *P* est une face plane). Si ce dernier porte la valeur 'UEF', la face *P* est coloriée en vert.

Par ce biais, nous mettons en place une vingtaine de règles pour l'exploitation des résultats du transformateur. Les figures suivantes montrent deux différents ensembles de règles activés.

Mise en Oeuvre du transformateur

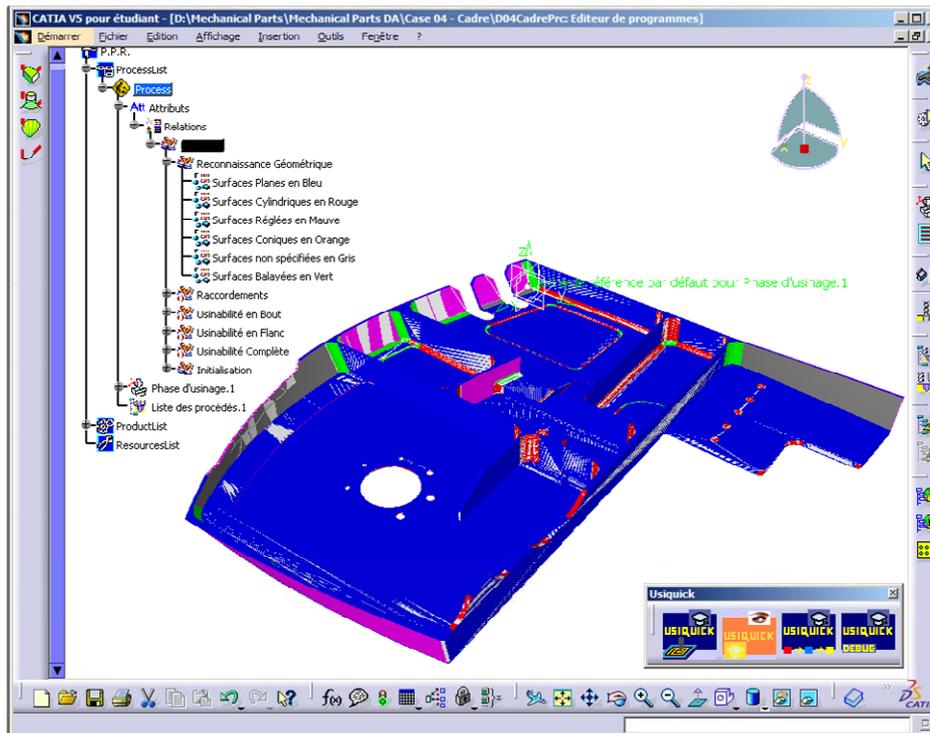


Figure 150. Activation de la reconnaissance géométrique : les faces planes sont coloriées en bleu, les faces cylindriques en rouge, les faces réglées en mauve, les faces coniques en orange, les faces balayées en vert et celles non spécifiées en gris

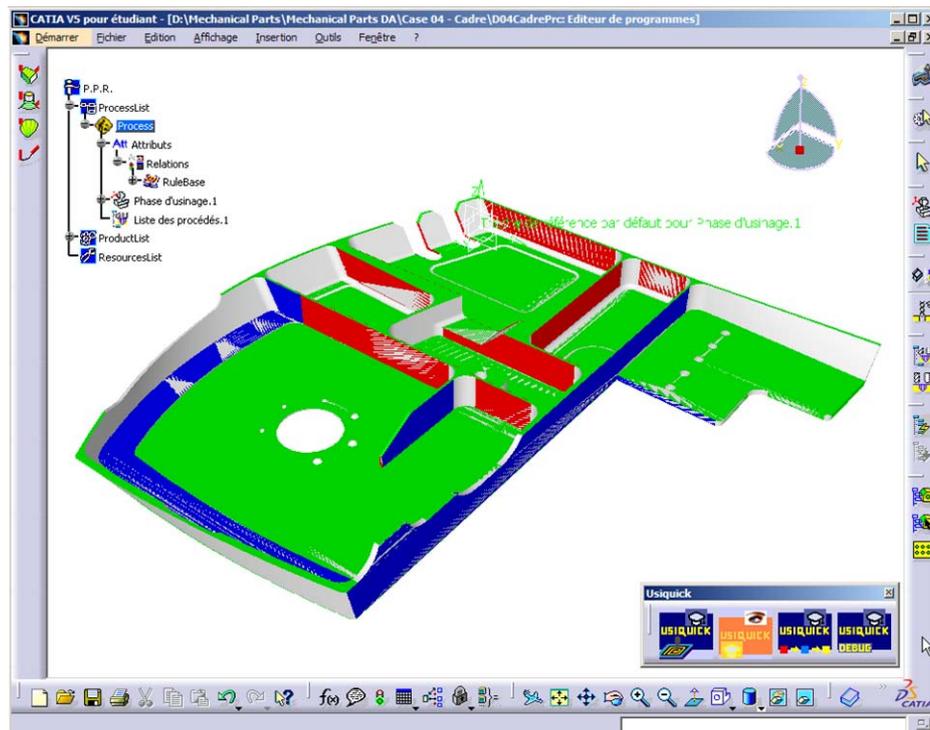


Figure 151. Activation de l'usabilité en bout : les faces en rouges sont complètement inaccessibles en bout, celles en bleu le sont partiellement et celles en vert complètement accessibles.

II. Exploitation des résultats par le biais de la vue d'usinage

L'idée est de pouvoir proposer au préparateur des outils de revue de l'usinabilité de la pièce. Par exemple le gammiste est intéressé par les différents rayons de raccordement de la pièce, ou tout simplement par les directions d'usinage d'une certaine face (Figure 152).

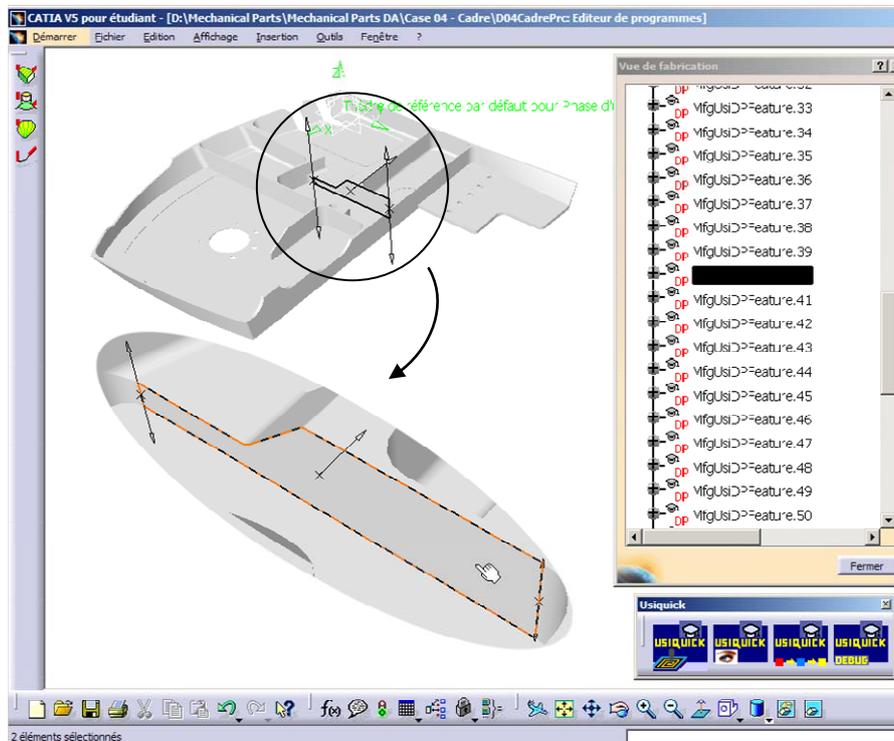


Figure 152. Directions d'usinage en flanc d'une face particulière.

III. Exploitation par le biais du modèle Feature

Le préparateur peut avoir accès aux informations complètes portées par une face ou une arête.

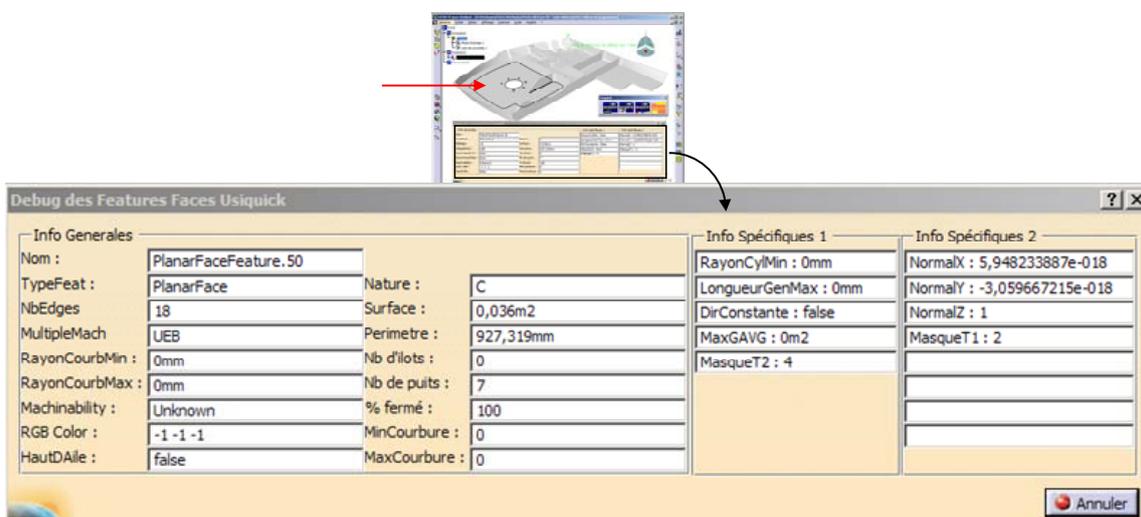


Figure 153. Accès à toutes les informations portées par la face sélectionnée.

IV. Exploitation par le biais de l'atelier CATIA 3D

Le préparateur peut activer la visualisation dans l'arbre CATIA des éléments 3D créés. Ces éléments sont les zones non usinables et le plan de référence qui constitue généralement le premier plan de posage.

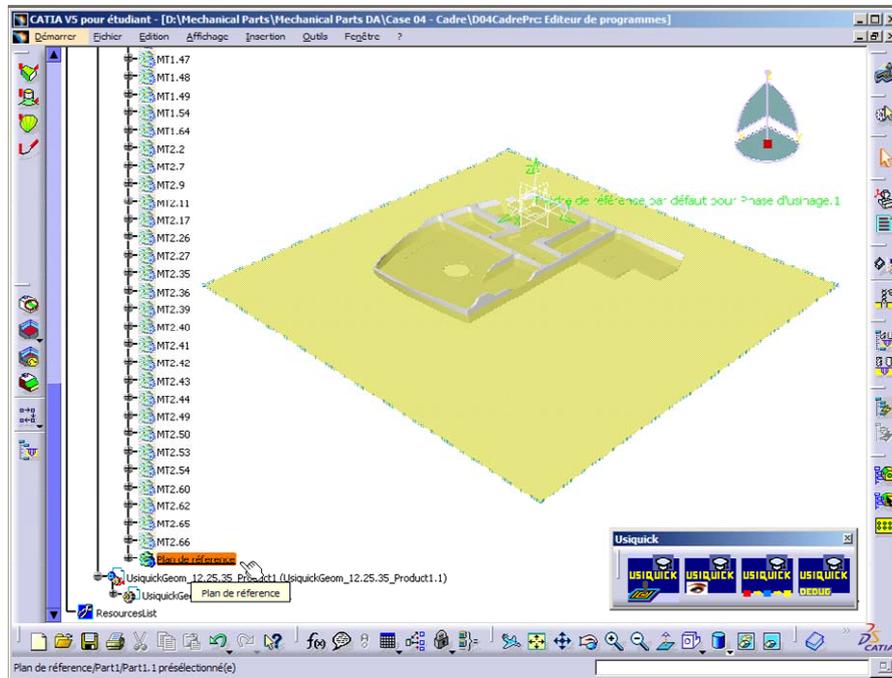


Figure 154. Activation du corps 'Plan de référence'

V. Exploitation par le biais de la Justification

Les interactions entre l'IRCCyN et le CRAN ont permis la définition et la mise au point de l'objet 'Justification' (Figure 155).

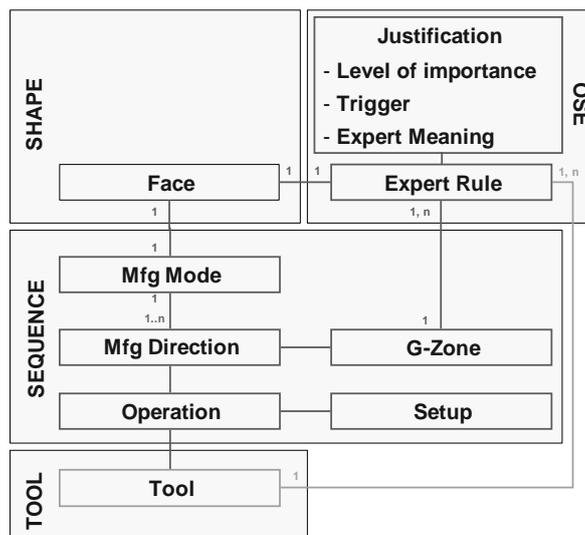


Figure 155. Proposition du modèle Justification [CAN 06]

La maquette développée selon ces éléments est présentée dans la figure 156. Elle permet la navigation dans ce réseau de décision.

En cliquant sur une face (en bleu clair) nous avons accès aux faces influentes (en rouge) et aux faces influencées (en jaune). Les faces influentes contiennent les caractéristiques qui affectent les résultats sur la face d'étude. Les faces influencées sont celles qui seront affectés par les valeurs des attributs de la face d'étude.

Cette navigation permet une vérification « projet » par les développeurs et une vérification « experte » par les utilisateurs des résultats.

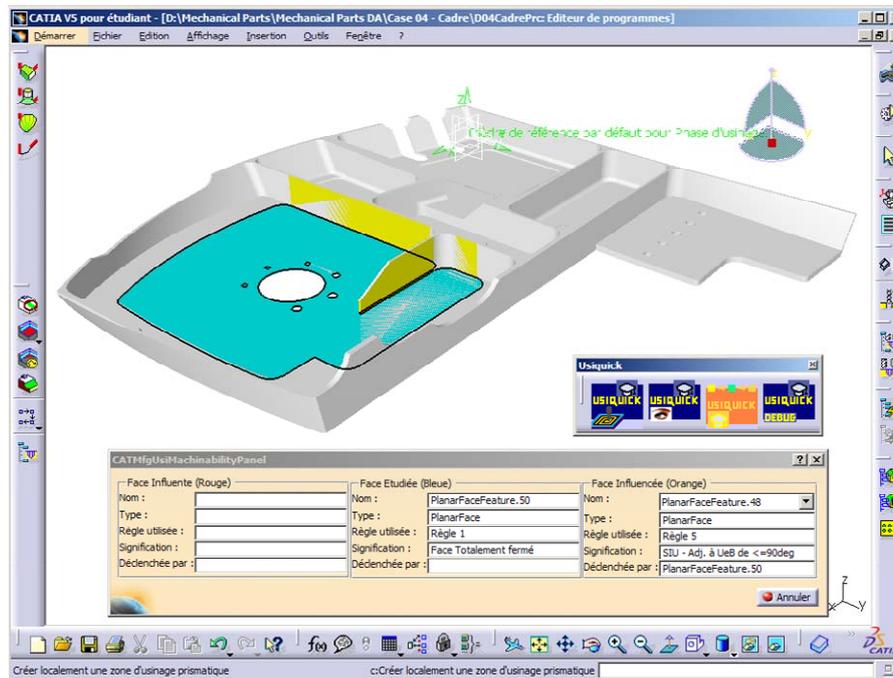


Figure 156. Les faces influencées par le résultat de l'étude de la face bleue.

C. Confrontation Industrielle

Cette validation industrielle menée conjointement entre Mr Bernard Goemaere, membre de l'équipe UPN (Unité de Production Numérique) de l'usine d'Argenteuil de Dassault Aviation, et Ramy HARIK, démontre deux aspects : le gain en temps d'analyse dans la compréhension de la pièce et la fiabilité des résultats obtenues. Messieurs Jean-Marc GRILLET et Christian ROUCHON ont validé, à plusieurs reprises, les différents travaux et résultats. Messieurs Thierry FAYS et David KEULEYAN y ont participé occasionnellement.

USIQUICK, ou plutôt le transformateur USIQUICK, est testé régulièrement sur 15 Pièces mécaniques qui présentent des caractéristiques différentes. Six pièces conçues au CRAN pour tester des cas particuliers (usinage en bout, usinage en flanc, directions d'usinage) ont aussi été régulièrement testées.

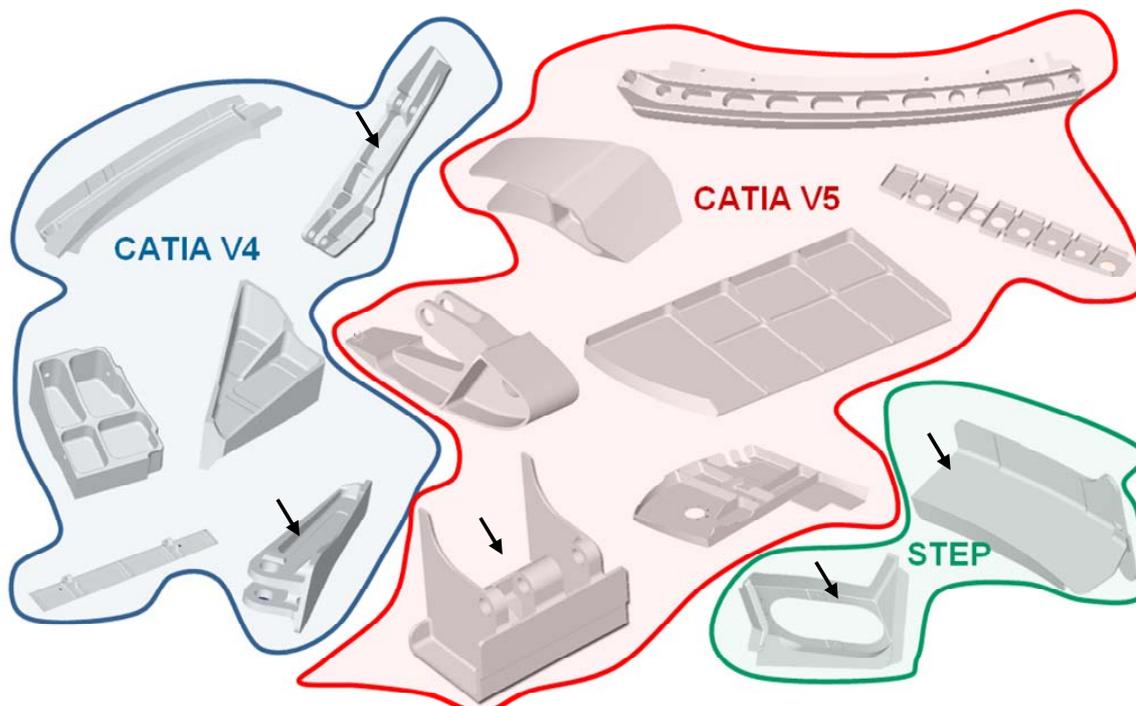


Figure 157. Pièces aéronautiques des tests

Ces pièces choisies proviennent de plusieurs versions du logiciel CATIA V5 ou V4, certaines sont en format neutre STEP. L'approche USIQUICK est totalement indépendante du modelleur CAD. Seules la topologie et la géométrie de la pièce sont nécessaires. La confrontation est menée sur 5 pièces différentes indiquées par une flèche noire sur la figure 157. Ces pièces se séparent en deux groupes. Groupe 1 de 2 pièces : le Transformateur est exécuté et ses résultats sont visualisés et validés. Groupe 2 de 3 pièces, en plus de l'exécution du Transformateur sur la pièce, un opérateur effectue manuellement une analyse de la pièce, les résultats fournis par le Transformateur et ceux trouvés par l'opérateur sont comparés.

Groupe 1 - Application directe du transformateur

Deux pièces, une du « Falcon » et une du « Rafale » (Figure 158), comportant des difficultés de fabrication pour la première et de compréhension globale (d'analyse) pour la deuxième ont été présentées en traitement direct lors du séminaire de clôture d'USIQUICK. Ces mêmes pièces sont l'objet du tutorial USIQUICK.

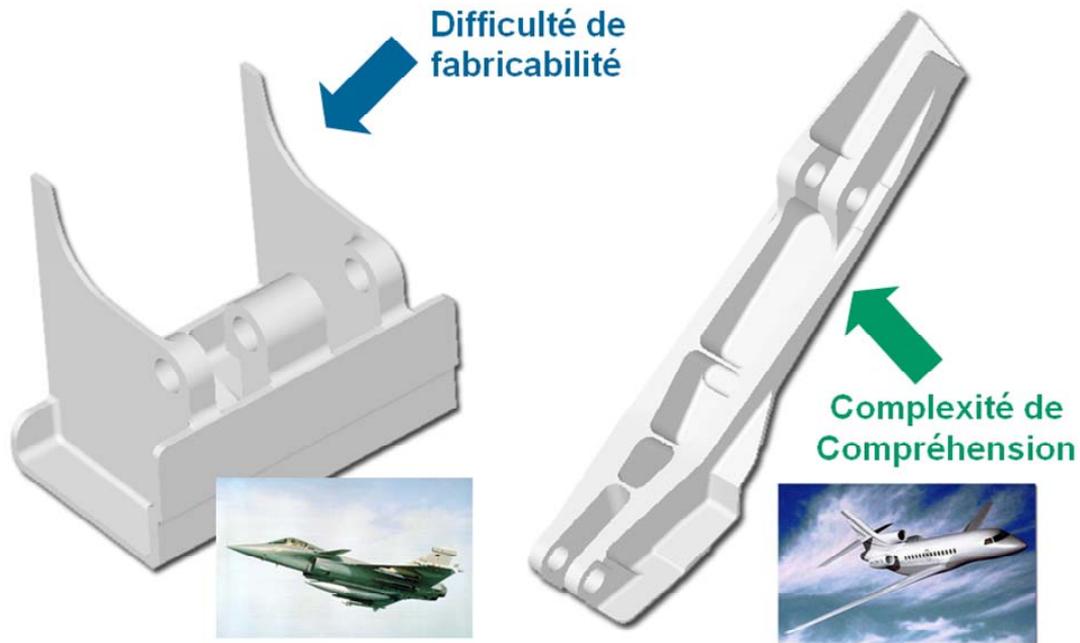


Figure 158. Pièces de la démonstration 'LIVE'

Dans cette démarche, l'opérateur se sert des résultats du transformateur pour construire sa gamme. Les visualisations lui permettent d'appréhender plus rapidement la géométrie pièce selon le point de vue usinage. Ceci induit une réduction du temps de son industrialisation.

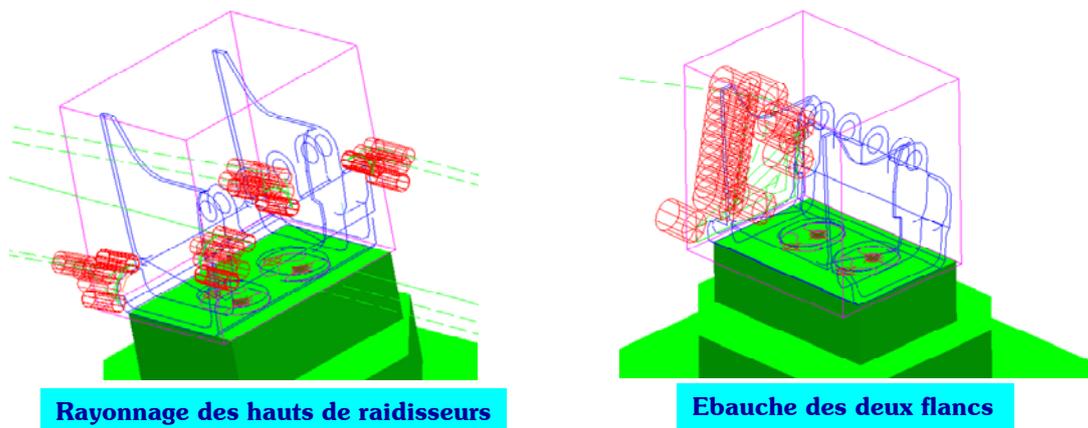


Figure 159. Exemple d'opérations sur la pièce du Falcon

Groupe 2 - Validation par comparaison

Les trois pièces restantes (Figure 160) ont fait l'objet d'une comparaison entre le travail manuel de l'opérateur et l'application automatique du Transformateur.

Caractéristiques du choix de la pièce A :

1. Existence d'un seul masque d'usinage (minime)
2. Pièce aéronautique par excellence (beaucoup d'entités minces)
3. Posage évident

Caractéristiques du choix de la pièce B :

1. Posage difficile à déterminer
2. Existence de plusieurs masques
3. Pièce aéronautique par excellence (beaucoup d'entités minces)

Caractéristiques du choix de la pièce C :

1. Pièce typique pour l'étude des zones masquées en bout et en flanc

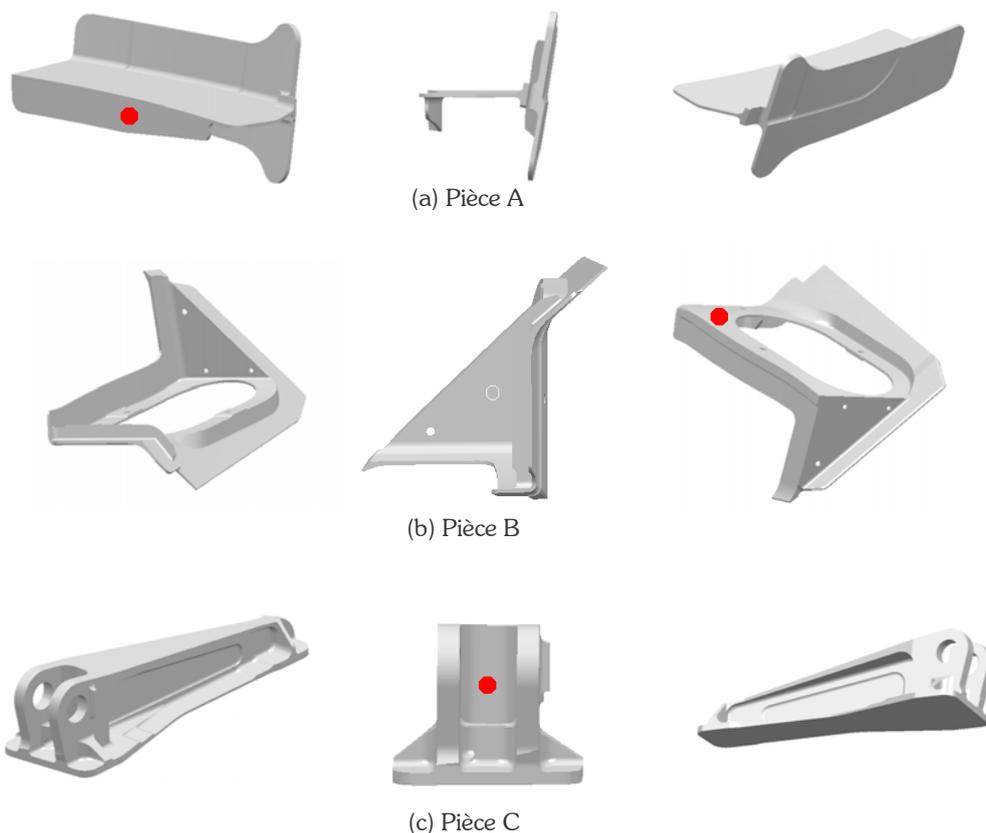


Figure 160. Pièces de comparaison

Cette comparaison montre les apports du Transformateur pour la compréhension de la pièce par l'opérateur et la proposition de gamme. Elle fait ressortir la capacité du Transformateur à mettre en évidence l'usinabilité des faces et les difficultés éventuelles d'usinage.

Dans la suite nous présentons la comparaison des résultats sur la pièce C pour chacune des étapes suivantes:

- 1- Reconnaissance géométrique et identification des surfaces de raccordement
- 2- Extraction des directions d'usinage
- 3- Calculs de fabricabilité en bout et en flanc
- 4- Proposition d'un premier plan de posage

I. Reconnaissance géométrique et identification des surfaces de raccordement

La caractérisation USIQUICK des faces et arêtes consiste à associer à chacune de ces 2 entités les informations nécessaires au calcul de l'usinabilité qui sont pour la face : son type (plane, cylindrique, réglée, torique, raccordement...), sa convexité/concavité, son rayon de courbure mini, son aire, son périmètre, sa boîte englobante... et pour l'arête : son type (droite, circulaire, quelconque), sa qualification vis à vis de ses faces adjacentes (O, F, TO, TF), le rayon de courbure mini et maxi, l'angle des tangentes normales à l'arête... Les faces participant potentiellement à des fonds minces ou des hauts d'aile sont également déterminées.

Cette caractérisation réduit le travail du préparateur d'une demi-journée à quelques secondes pour la pièce C (Figure 161).

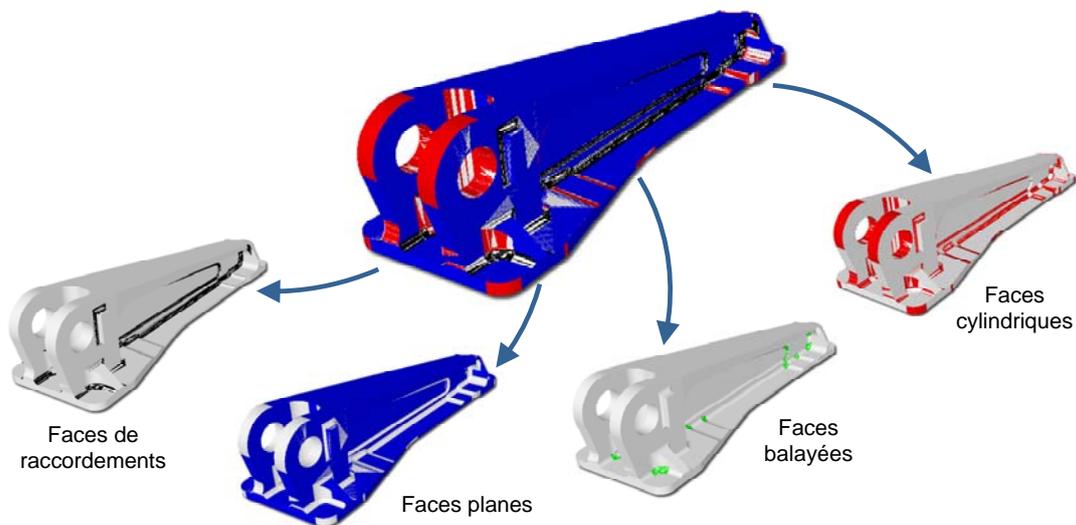


Figure 161. Reconnaissance géométrique

II. Extraction des directions d'usinage

Cette étape du transformateur est essentielle pour le calcul de la fabricabilité. En étudiant les faces intrinsèquement, arête par arête, puis au niveau des transitions des points, on réussit à extraire les directions d'usinage concernant la face. Ces directions sont réparties en plusieurs priorités. L'opérateur et le Transformateur ont obtenus des résultats identiques.

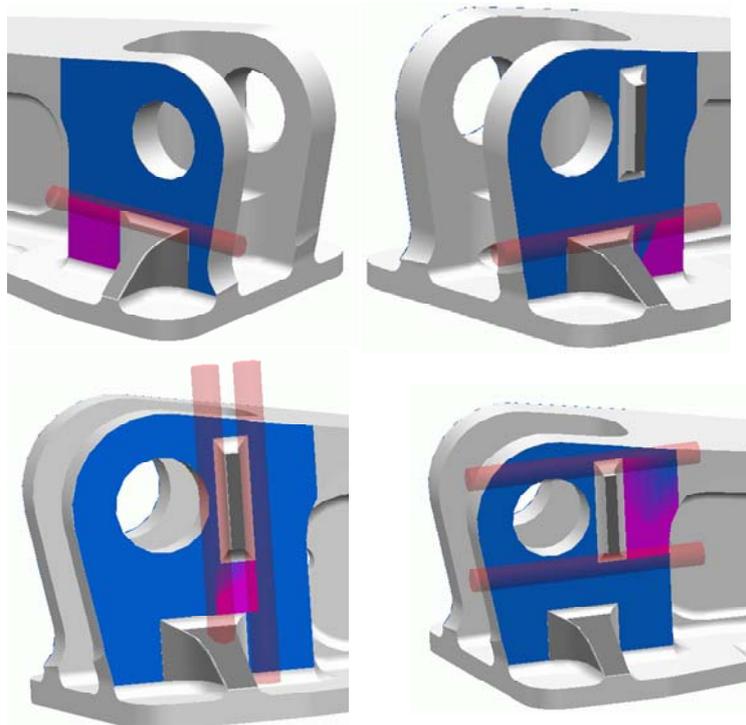


Figure 162. Directions d'usinage en flanc pour la face bleue

Une autre utilité de ces directions est de les représenter sur la sphère d'accessibilité de la machine (Figure 163). Par rotation de l'ensemble des directions dans la sphère machine on peut vérifier que ces directions sont accessibles par la cinématique machine mais aussi orienter convenablement le posage. Sur l'exemple de la figure 163 le préparateur appréhende plus facilement les deux plans de posage de la pièce, en la regardant et en la faisant tourner. La concentration des directions d'usinage selon deux cercles conduit à prendre les plans de ces cercles en tant que plans de posage.

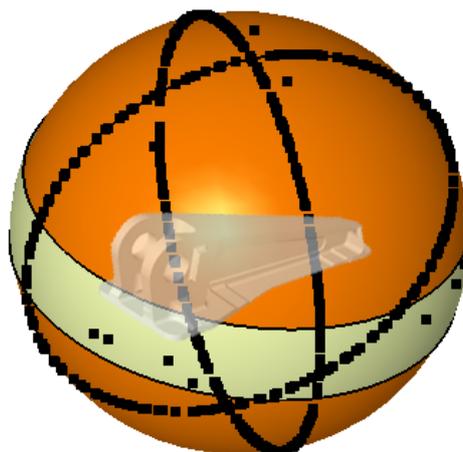


Figure 163. Sphère d'accessibilité de la pièce, les directions d'usinage sont représentées par des points sur la sphère.

III. Calculs de fabricabilité en bout et en flanc

L'opérateur et le Transformateur ont obtenu des résultats de l'étude de la fabricabilité identiques pour l'usinage en bout (Figure 164a) et l'usinage en flanc (Figure 164b). La mémorisation des zones non usinable dans des corps « CATIA » distincts devrait permettre l'usage automatique de la fonction 'reprise de zones' dans CATIA.

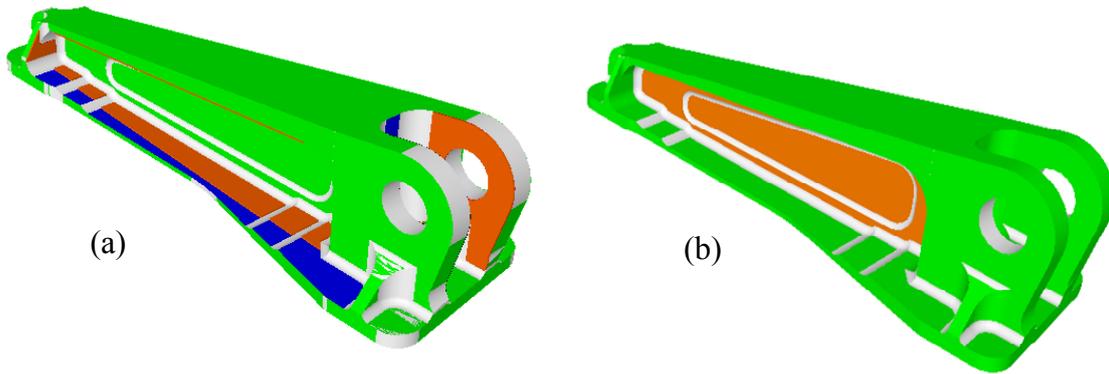


Figure 164. Fabricabilité (a) en bout de la pièce et (b) en flanc ; les zones non usinables sont en oranges.

IV. Proposition d'un premier plan de posage

Le transformateur propose un premier plan de référence Pr tel que le premier plan de posage soit Pr même ou un plan perpendiculaire à Pr . Sur ce même exemple le plan de posage proposé par l'opérateur est effectivement le plan perpendiculaire au plan de référence proposé par le transformateur.

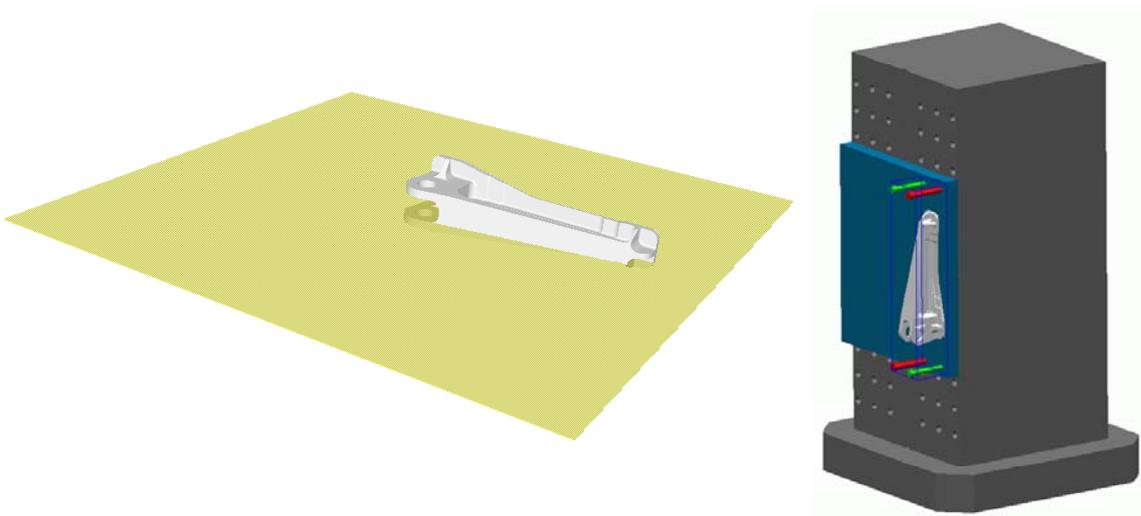


Figure 165. Premier plan de posage proposé par le logiciel

V. Superposition des différents résultats

Un des résultats de cette confrontation industrielle concerne l'usage du prototype. Les opérateurs ont remarqué la possibilité de superposer les différents résultats. Cette superposition (direction + usinabilité + plan de référence) permet une meilleure compréhension de la pièce par l'opérateur.

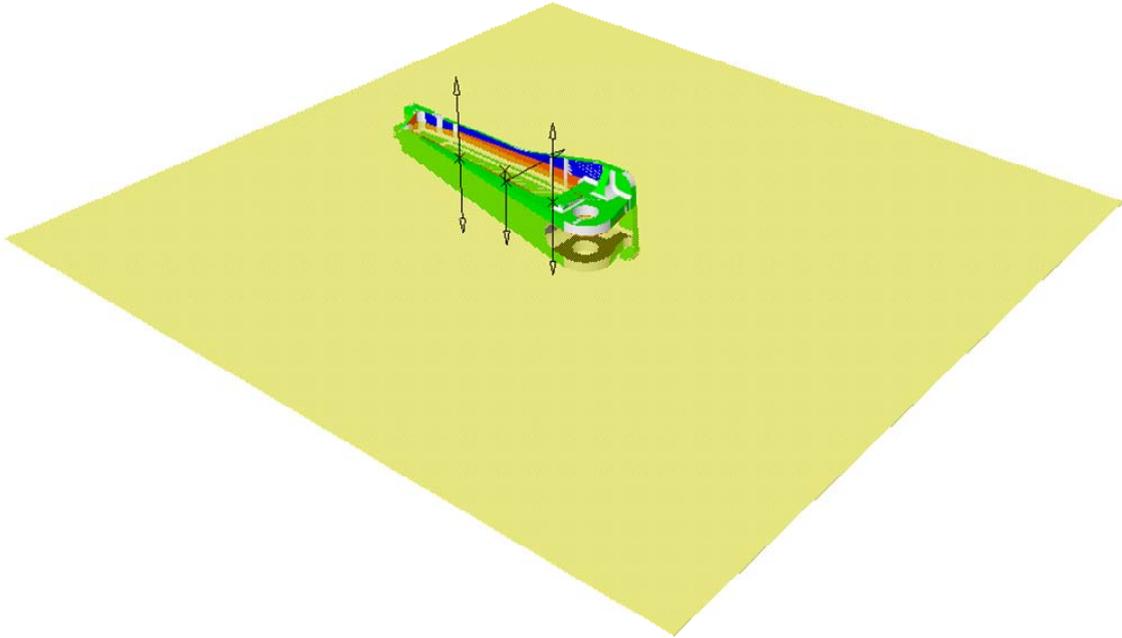


Figure 166. Superposition des différents résultats

3. Conclusion des préparateurs Dassault Aviation

Au final de cette confrontation industrielle, les préparateurs de Dassault Aviation concluent que le transformateur permet un gain substantiel dans l'analyse et la compréhension de la pièce en l'état actuel. Le module de reconnaissance des types de faces, et leur coloriage séparément, est particulièrement intéressant pour estimer les plans d'appui. Le module d'extraction et de visualisation des directions d'usinage permet d'estimer le nombre de posages nécessaires sans visualisation de la pièce. Ce même module permet de faire le choix de la machine d'usinage par rapport à son accessibilité.

La fiabilité des résultats présentés permet d'écarter une bonne partie des interprétations humaines erronées. Les fonctions avancées d'étude de l'accessibilité outil permettent une première approche sur les stratégies d'usinage possibles surtout concernant la revue d'usinabilité en bout et en flanc. Finalement, les préparateurs Dassault Aviation constatent que l'outil actuel apporte une aide à tous les niveaux de la filière numérique, du BE à la Fabrication.

Conclusion

1. Conclusions

Ces travaux de recherche présentent les bases d'un logiciel d'assistance à la génération de gamme d'usinage : le Transformateur. Ce dernier permet de raccourcir le temps de prise en main des pièces par le préparateur. Il lui fournit un ensemble d'informations pour l'aider à déterminer rapidement la meilleure stratégie d'usinage.

En permettant cette prise en main virtuelle de la pièce, le Transformateur, va se substituer en partie à l'opérateur en effectuant automatiquement une analyse de la pièce. Il va fournir une visualisation 3D colorée de celle-ci où les couleurs apporteront un ensemble d'informations importantes significatives pour l'opérateur en ce sens qu'elles vont l'aider à raisonner et préparer la gamme et la génération de trajectoires. Cette analyse étant systématique, l'opérateur sera sûr que toute la pièce a été analysée et qu'aucune face n'a été oubliée ce qui est souvent le cas lorsque l'analyse est faite uniquement par observation de la pièce à l'écran.

Dans un premier temps, l'état de l'art présenté au premier chapitre nous a permis de situer les travaux existant dans différents domaines qui se relèvent intéressants pour notre recherche. De ce fait, nous avons abordé les méthodes de génération automatique de gamme d'usinage qui nous font tendre vers un système interactif Opérateur/USIQUICK au lieu d'une automatisation complète. De la reconnaissance d'entités d'usinage ressort le besoin d'un enrichissement en contexte des différents éléments d'une pièce. Ce besoin est intégré dans le concept d'entité d'usinage élémentaire. L'étude de l'analyse de fabricabilité des pièces mécaniques prouve qu'il est important de pouvoir vérifier au plus tôt la faisabilité des opérations d'industrialisation et de pouvoir la démontrer. L'usinage en flanc illustre le manque d'études dans ce domaine : faces planes non traitées, obstacles non pris en compte... Finalement, les algorithmes de calculs d'accessibilité et de visibilité nous permettent de proposer deux approches qui sont utilisées ultérieurement pour les calculs d'usinabilité.

Le chapitre 2 se scinde en quatre parties dont les trois premières concernent la définition des fonctions générales nécessaires à l'enrichissement du modèle CAO et la dernière intéresse la mise en place d'une interface IHM en fonction des attentes du préparateur. Les fonctions CAPP générales nécessaires à l'enrichissement du modèle CAO afin de lui adjoindre les informations nécessaires aux étapes de Préparation et de Calcul de trajectoire sont définies à la fin de cette partie.

L'enchaînement des étapes permettant le calcul de ces fonctions est déterminé.

Il comporte une première étape de caractérisation géométrique qui enrichit le modèle B-Rep de la pièce en vue de réaliser les calculs technologiques élémentaires. Ces attributs conditionnent les résultats et les choix à déterminer ultérieurement. Les éléments (corps, face, arête, point) sont dotés de différents attributs. Ces derniers permettent de séparer les éléments en plusieurs groupes, chaque groupe induisant un traitement différent.

La deuxième étape d'enrichissement technologique réalise le typage des faces. Ce typage (Accès d'usinage, Mode d'usinage, Outils capables et typage) permet d'affecter les informations d'usinage à la face. Les faces deviennent des entités d'usinage élémentaires.

La troisième et dernière étape regroupe les différentes EUE (entité d'usinage élémentaire) en des EU (entités d'usinage) de niveau sémantique supérieur. Ce regroupement se fait par une analyse du graphe d'adjacence des faces de la pièce. Nous avons exploité l'enrichissement technologique au niveau des EUE et la typologie des liens entre ces faces afin de regrouper des ensembles de faces susceptibles d'être considérées comme un tout du point de vue d'une opération d'usinage. Cette typologie identifie plusieurs EU notamment les 'Entités Mince' qui sont présentée de manière plus détaillée.

Une dernière partie du chapitre 2 propose des « fiches d'identité des fonctions » qu'un système automatique d'aide à la génération de gamme d'usinage doit à notre avis accomplir. Cette dernière s'attache à organiser les résultats de la transformation de la pièce dans un ordre logique préparateur.

Enfin, nous validons dans le chapitre 3 les spécifications et fonctions proposées par la mise en œuvre d'un prototype logiciel en CAA® permettant l'implémentation du module de transformation sous CATIAV5®. Ensuite, nous exposons une confrontation industrielle menée conjointement avec Dassault Aviation pour tester la validité du transformateur à l'état du développement en décembre 2006. Cette validation industrielle a montré les apports du Transformateur pour la compréhension de la pièce par l'opérateur et la proposition de gamme.

Notre travail de recherche permet spécifiquement des avancées d'un point de vue scientifique et industrielle sur :

I. L'accès d'usinage en flanc des faces planes (Scientifique)

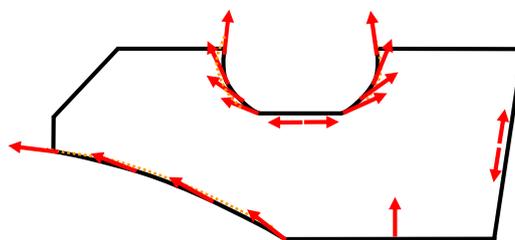


Figure 167. Directions d'usinage en flanc

Les directions d'usinage pour usiner en flanc une face plane peuvent être infinie. Nous avons proposé une méthode à base de règles métiers qui extrait les directions d'usinage optimales à l'usinage en flanc d'une face plane. Ces directions sont classées en plusieurs priorités.

II. Le calcul d'usinabilité en flanc (Scientifique)

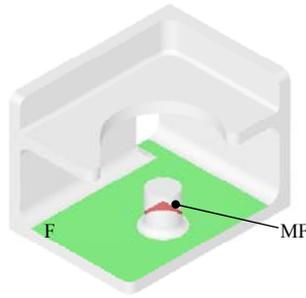


Figure 168. Usinage en flanc

Nous avons présenté une technique algorithmique qui permet de déterminer les zones non usinable en flanc des faces réglées. Ces zones sont calculées en plusieurs étapes que nous présentons en détail. Les différentes notions de masques et champs d'usinage sont présentés.

III. L'extraction des entités d'usinage type par le biais du graphe d'adjacence (Scientifique)



Figure 169. Entité flanc externe

Par le biais de l'enrichissement du graphe d'adjacence des faces d'une pièce, nous présentons une technique de reconnaissance des entités d'usinage de niveau sémantique supérieure.

IV. L'identification des entités minces (Scientifique)

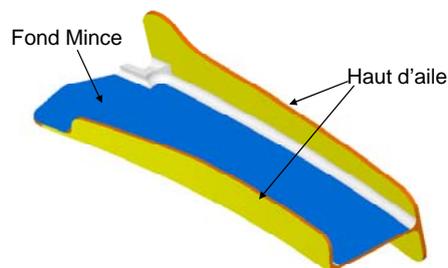


Figure 170. Entités Minces

Nous avons détaillés l'étude des entités minces qui représentent les zones fragiles d'une pièce mécanique. Pour garantir un allègement maximal, les pièces mécaniques sont constituées de parois minces. L'algorithme d'identification de 4 étapes est présenté.

V. Le modèle de passage de la CAO vers la FAO (Scientifique)

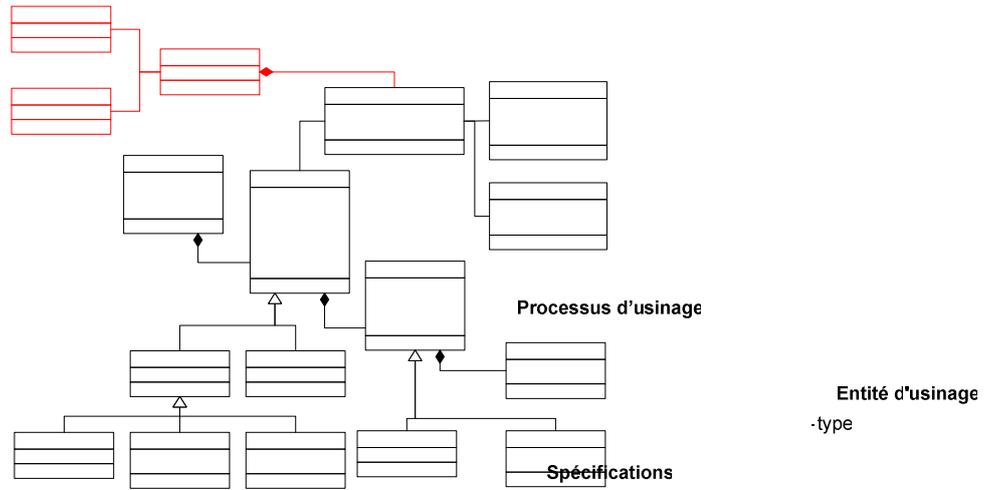


Figure 171. Modèle USIQUICK

Les modèle CAO ne supportent pas les informations nécessaires à la fabrication. Notre modèle USIQUICK amène une solution. Le modèle BREP d'origine est enrichi sémantiquement afin qu'il puisse contenir des informations utiles à la génération de gamme et de trajectoires.

VI. La définition des fonctions CAPP (Industriel)



Figure 172. Fonctions CAPP

Les fonctions proposées pour le système d'aide à la génération quasi automatique des gammes engendrent une réduction directe du temps de compréhension de la pièce. Ces fonctions sont ordonnées en priorités relatives pour l'industrie aéronautique.

VII. La prise en main des pièces mécaniques (Industriel)

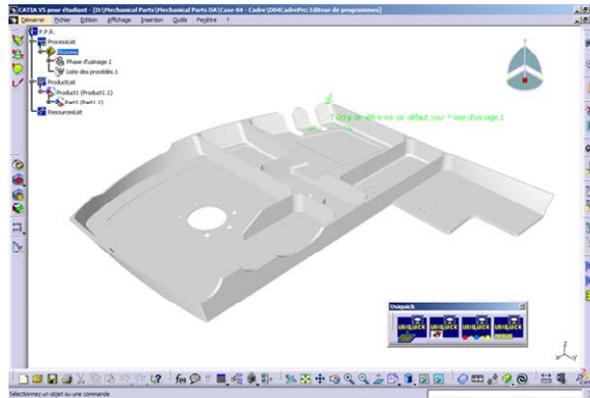


Figure 173. Entité flanc externe

Au niveau informatique, un ensemble de fonctionnalités ont été mises en oeuvre. Ces fonctionnalités, testées sur une dizaine de pièces aéronautiques présentant différentes difficultés, donnent des résultats intéressants, permettant d'envisager l'intégration de ces fonctionnalités dans le logiciel CATIA de Dassault Systèmes. Cet ajout donnera à CATIA une avancée dans les domaines de la reconnaissance et de la compréhension de la géométrie.

2. Perspectives

Après avoir résumé très succinctement les principaux apports de notre thèse, nous dégagons les perspectives de recherche suivantes :

I. Usinabilité

Nous avons présenté la méthode pour calculer l'usinabilité des faces, mais nous n'avons pas intégré le rayon d'outil réel. Il serait intéressant de prendre en compte cette valeur du rayon afin d'obtenir le vrai résultat d'usinabilité.

Cette prise en compte du rayon induira l'étude des Epsi-masques qu'on a présenté brièvement. Il faudra approfondir cette notion, pour une meilleure estimation des Epsi-masques. Notons que cette notion est une première prise en compte du diamètre de l'outil.

II. Fonctions CAPP

Une synthèse des fonctions Transformateur devrait être entreprise afin de définir de manière plus rigoureuse et mathématique l'ensemble des fonctions que doit comporter le Transformateur. Ces fonctions devraient être définies en prenant en compte les possibilités des modeleurs géométriques. Une première approche de ces fonctions est présentée dans le tableau ci-dessous. Le test de celles-ci sur un grand nombre de pièces différentes devrait « démontrer » si elles sont nécessaires et suffisantes.

nom	fonction	résultat
<i>geom_face_is_geom(F)</i> <i>geom = plane cyl reglee...</i>	géométrie de la face	booléen : oui/non
<i>UeB(F, dia)</i>	face <i>F</i> usinable en bout avec outil de diamètre <i>dia</i>	% [0,100]
<i>UeF(F, dia, dir)</i>	face <i>F</i> usinable en flanc avec outil de diamètre <i>dia</i> selon les directions <i>dir</i>	% [0,100]
<i>UQ(F, dia, dir)</i>	face <i>F</i> usinable en balayage avec outil (sphérique) de diamètre <i>dia</i> selon les directions <i>dir</i>	% [0,100]
<i>dir_visible(F)</i>	directions selon lesquelles la face <i>F</i> est visible	directions
<i>dir_UeB(F)</i>	direction selon laquelle la face <i>F</i> est usinable en bout	1 direction
<i>dir_nat_UeF(F)</i>	directions naturelles selon lesquelles la face <i>F</i> est usinable en flanc	directions
<i>sous_faces_UeF(F, dia, dir)</i>	sous faces restantes si face <i>F</i> usinée en flanc avec outil de diamètre <i>dia</i> selon les directions <i>dir</i>	liste de faces
<i>dir_autres_UeF(F, dia)</i>	directions autres que les directions naturelles permettant l'usinage partiel de <i>F</i> avec outil de diamètre <i>dia</i>	directions
<i>face_appartient_a_element_mince(F)</i>	la face <i>F</i> appartient à un élément mince	dessus/cote/non
<i>distance_maxi_brut(F, dir)</i>	distance maxi de <i>F</i> au brut suivant directions <i>dir</i>	longueur
<i>longueur_maxi_UeF(F, dir)</i>	longueur maxi dans <i>F</i> selon les directions <i>dir</i>	longueur
<i>masque_type_1(F)</i>	calcul masque type 1 de la face <i>F</i>	liste de faces
<i>masque_type_2(F, dir)</i>	calcul masque type 2 de la face <i>F</i> selon les directions <i>dir</i>	liste de faces
<i>haut_pot_ext_elancement(F)</i>	hauteur potentielle de l'extrémité d'élanement de la face <i>F</i>	longueur
<i>enchainement_faces_UeF(F)</i>	détermine l'enchaînement de faces UeF contenant la face <i>F</i>	liste de faces ordonnées
<i>face_appartient_ench_faces(F)</i>	face <i>F</i> appartient déjà à un enchaînement de faces calculées ?	oui/non
<i>enchainement_faces_UeB(F)</i>	détermine l'enchaînement de faces UeB contenant la face <i>F</i>	liste de faces
<i>appartient_a_plusieurs_enchaint(F)</i>	la face <i>F</i> appartient à plusieurs enchaînements de faces	oui/non
<i>face_appartient_a_haut_d_aile(F)</i>	la face <i>F</i> appartient à un haut d'aile	oui/non
<i>enchainement_faces_Ht_d_aile(F)</i>	détermine l'enchaînement de faces haut d'aile contenant la face <i>F</i>	liste de faces ordonnées
<i>face_parallele_a_face_UeB(F)</i>	la face <i>F</i> est parallèle à une face Ueb (du même côté)	oui/non

III. Intégration Dassault Systèmes

Dassault Systèmes ayant constaté l'effet « tenaille » du Transformateur entre CAO et FAO, notamment au niveau de compréhension de la fabricabilité de la pièce, il est envisagé de poursuivre le développement du Transformateur afin d'aboutir à un logiciel Industriel dans un délai de 1 à 2 ans.

Bibliographie

Remarques:

* Les références sont réparties selon leur appartenance aux différents états de l'art. Ainsi si la référence est suivi par [X] elle relève du domaine 'X'.

[A]	La gamme d'usinage
[B]	Les entités d'usinage
[C]	L'analyse de fabricabilité
[D]	L'usinage en flanc
[E]	La visibilité

* 27-4:553-585 signifie volume 27, numéro 4, les pages allant de 553 à 585.

* Les références en gras relèvent des publications concernant l'auteur.

- [ALT 89] ALTING L, ZHANG H. "Computer Aided Process Planning: the state of the art survey", *International Journal of Production Research*, 27-4:553-585, 1989 [A]
- [ANS 94] ANSELMETTI B. "Génération automatique de gammes de tournage et contribution à la gestion d'une cellule de production", *Habilitation à diriger des recherches*, Université de Nancy 1, Nancy, France, 1994 [A]
- [ANW 00] ANWER N., "Méthodologie d'analyse de raisonnement pour la génération automatique des gammes d'usinage en fraisage. Contribution à la caractérisation des entités par analyse des contraintes d'usinabilité." *Thèse de doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Paris, France, 2000 [B]
- [BED 03] BEDI S., MANN S., MENZEL C., "Flank milling with flat end milling cutters", *Computer-Aided Design*, 35:293-300, 2003 [D]
- [BER 02] BERNARD A., "Outil stratégique pour la phase d'industrialisation", *Chapitre de l'ouvrage : Fabrication assistée par ordinateur*, sous la direction de : BERNARD A., Editions Lavoisier, p.22-31, ISSN/ISBN : 2-7462-0618-8, 2002 [B]
- [BEL 94] BELLOY P., "Intégration de connaissance métier dans la conception: un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage", *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 1994 [B]
- [BOO 94] BOOTHROYD G., P. DEWHURST et W. KNIGHT, "Product Design for Manufacture and Assembly", Marcel Dekker Inc., 1994 [C]
- [BRI C] BRISSAUD D., "Conception de gammes d'usinage", *Cours*, Laboratoire 3S, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France [A]
- [BRI 90] BRISSAUD D., "Conception Automatique de gammes d'usinage : point de vue expertise", *Chapitre de l'ouvrage : La gamme automatique en usinage*, sous la direction du Groupe GAMA, Editions Hermès, Paris, France, 1990 [A]
- [BRI 92] BRISSAUD D., "Système de conception automatique de gamme d'usinage pour les industries manufacturières", *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 1992 [B]
- [BRI 03] BRISSAUD D., "La FAO: une activité du développement de produits", *Chapitre de l'ouvrage : Fabrication assistée par ordinateur*, sous la direction de : BERNARD A., Editions Lavoisier, p.351-371, ISSN/ISBN : 2-7462-0618-8, 2002 [C]
- [CAP 05] CAPPONI V., "Les interactions homme-machine dans la génération assistée de gammes d'usinage : application aux pièces aéronautiques de structure", *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 2005 [A-B]
- [CAN 06] CANDLOT A. et HARIK R., "Expert knowledge justification in PLC models applied to flank milling", Special Track "Integrated Design of Product and Manufacturing Process", 12th IFAC Symposium on Information Control Problems (INCOM), Saint-Etienne (France), May 17 - 19, 2006

- [CHA 88] CHANG T.C., ANDERSON D.C. et MITCHELL O.R., "QTC—an integrated design/manufacturing/vision inspection system for prismatic parts", *Proceedings of the ASME 1988 CIE*, 1:417–426, 1988 [A]
- [CHA 90] CHANG T.-C., "Expert process planning for manufacturing", Editions Addison-Wesley, ISSN/ISBN: 0-201-18297-1, 1990 [A]
- [CHA 05] CHAPOTOT, E., "Développement d'une méthode de détection de collision adaptée au scanning par capteur plan laser et intégration de cette méthode dans une approche d'aide au contrôle de pièce.", Master 2 Recherche, Nancy Université, 2005 [E]
- [CHE 92] CHEP, A., "Modèle de représentation et d'utilisation des connaissances nécessaires à la conception d'un processus de fabrication : application à la génération automatique de gammes d'usinage en tournage", *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Paris, Paris, France, 1992 [A]
- [CHE 99] CHEN H.Y. et POTTMANN H., "Approximation by ruled surfaces", *Journal of computational and Applied Mathematics*, 102:143-156, 1999 [D]
- [DER 05] DERIGENT W., "Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques : Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK", *Thèse de doctorat*, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Nancy, France, 2005 [A-E]
- [DER 05b] DERIGENT. W., HARIK R. et RIS G., "Détermination des directions de visibilité par opérations volumiques", *Colloque national AIP Priméca*, La Plagne, 2005 [E]
- [DES 81] DESCOTTE Y. et LATOMBE G., "A problem solver that plans how to machine mechanical parts", *Chapitre de l'ouvrage: Automating knowledge acquisition for expert systems*, Editions Kluiver Academic, 1988. [A]
- [DEN 92] DENEUX D. et MARANZANA R., "Technological Attributes: the Missing Link Between CAD, CAPP and CAM", *1st ICEM users conference*, Nashville, USA, 1992 [A]
- [DEN 93] DENEUX D., "Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques d'usinages dans un modèle technologique de produit", *Thèse de doctorat*, Université de Valenciennes, France, 1993 [B]
- [DFM 94] *Design for Manufacturing DFM: Guide for improving the manufacturability of industrial products*, EUREKA publishers, 1994 [C]
- [DUN 78] DUNN M.S. et MANN W.S., "Computerized Production Process Planning", *Proceedings of the 15 Numerical Control Society Annual Meeting and Technical Conference*, Chicago, USA, 1978 [A]
- [DUR 90] DURAND P., "GAGMAT : un système de génération automatique de gammes d'usinage intégré dans une chaîne complète de CFAO", *Chapitre de l'ouvrage : La gamme automatique en usinage*, sous la direction de : Groupe GAMA, Editions Hermès, Paris (France), 1990 [A]
- [ELB 98] ELBER G. et ZUSSMAN E., "Cone visibility decomposition of freeform surfaces", *Computer-Aided Design*, 30-4:315-320, 1998 [E]
- [EVE 80] EVERSHEIM W., FUCHS H., et ZONS K. H., "Automatic process planning with regard to production by application of the system AUTAP for control problems ", *12th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Belgrade, Serbia, 1980 [A]

- [FLO 89] DE FLORIANI L., "Feature extraction from boundary models of three dimensional objects", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11-8:785-798, 1989 [B]
- [GAM 90] Le groupe GAMMA, *La gamme automatique en usinage*, Hermès, 1990 [A-B]
- [GAN 01] GAN P. Y., LEE K. S. et ZHANG Y. F., "A Branch and Bound Algorithm Based Process-Planning System for Plastic Injection Mould Bases", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18:624-632, 2001 [A]
- [GAO 98] GAO S. et SHAH J.J., "Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph", *Computer-Aided Design*, 30-9:727-739, 1998 [B]
- [GAV 90] GAVANKAR P. et HENDERSON M.R., "Graph-based extraction of protrusion and depressions from boundary representations", *Computer Aided Design*, 22-7:442-450, 1990 [B]
- [GEN 85] GENERAL DYNAMICS CORPORATION, *Volume decomposition algorithm final report*, Arlington, Texas, USA, 1985 [B]
- [GON 05] GONG H., CAO L.X. et LIU J., "Improved positioning of cylindrical cutter for flank milling ruled surfaces", *Computer-Aided Design*, 37:1205-1213, 2005 [D]
- [GRA 05] GRABOWICK C., KALINOWSKI K. et MONICA Z., "*Integration of the CAD/CAPP/PPC*", *Journal of Materials Processing Technology* 164-165:1358-1368, Elsevier, 2005 [C]
- [GUP 95] S.K.GUPTA et D.S.NAU, "A systematic approach to analysing the manufacturability of machined part." Butterworth Heinemann, Elsevier, *Computer-Aided Design*, 27-5:323-342, 1995 [C]
- [GUP 95b] GUPTA S.K., NEGLI W.C. et NAU D.S., "*IMACS, A System for Computer-Aided Manufacturability Analysis*", International Joint Conference, Montreal, Quebec, Canada, 1995 [C]
- [HAR 07a] HARIK R., CAPPONI V. et DERIGENT W., "*Enhanced B-Rep graph-based feature sequences recognition using manufacturing constraints*", Proceedings of the CIRP Design Seminar, The Future of Product Development, Berlin, Germany, March 26-28, 2007
- [HAR 07b] HARIK R., DURUPT A., DERIGENT W. et RIS G., "*Identification des entités minces pour la fabrication*", 10ème colloque national AIP-Primeca, La Plagne, France, 17 - 20 Avril 2007.
- [HAR 06a] HARIK R., DERIGENT W. et RIS G., "*Automating the flank milling planar surfaces milling process: Extracting the machining directions*", 6th International conference on integrated design and manufacturing in mechanical engineering (IDMME), Alpexpo, Grenoble, France, May 17 - 19, 2006.
- [HAR 06b] HARIK R. et RIS G., "*Aeronautical planar flank milling automation: Computing the G-zones*", Proceedings of IDETC/CIE 2006, ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Philadelphia, Pennsylvania USA, September 10-13, 2006
- [HAR 06c] HARIK R., CAPPONI V., LOMBARD M. et RIS G., "*Enhanced functions supporting aeronautical process planning*", Proceedings of the Multiconference CESA'2006, Computational Engineering in Systems Applications, Beijing, China, October 4-6, 2006

- [HAR 06d] HARIK R., "Quelles fonctions pour un logiciel CAPP ?", Grand Colloque TIC 2006 - Lyon, France, 15-16 Novembre 2006.
- [HAR 05a] HARIK R., HERVIOU D., LOMBARD M. et RIS G., "Etude d'usinabilité en flanc d'une face en ingénierie intégrée", Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, 29 - 2 Septembre 2005.
- [HAR 05b] HARIK R., LOMBARD M. et DERIGENT W., "Product model adjustment methodology to support its product lifecycle management", Integrated Design and Production, Casablanca, Morocco, 9 - 11 November 2005.
- [HAN 00] HAN J. H., PRATT M. et REGLI W., "Manufacturing Feature Recognition from Solid Models: A Status Report", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2000 [B]
- [HIT 04] Anonyme, "High Throughput Production Processing 5 axis Titanium Components III (HITHRU III)", *Final Report*, NCMS Project No. 150339, National Center For Manufacturing Sciences, Michigan, USA, 2004 [A]
- [HOU 89] VAN HOUTEN F.J.A.M., VAN'T ERVE A.H., JONKERS F.J.C.M et KALS H.J.J., "PART, a CAPP System with a Flexible Architecture", *Proceedings of the 1st Inter. CIRP Workshop on CAPP*, Université de Hanovre, Allemagne, 1989 [A]
- [JON 92] DE JONG F., REITSEMA T. et HOOGEBOOM R., "Feature-Based Modelling: A Way to Improve the CAD/CAM Process", *International Journal of CAD/CAM and Computer Graphics*, 7-2:209-234, 1992 [B]
- [KAN 97] KANG J.K. et SUH S-H, "Machinability and Set-up orientation for Five-axis numerically controlled machining of free surfaces", *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 13:311-325, 1997 [E]
- [LAR 05] LARUE A. et ALTINTAS Y., "Simulation of flank milling processes", *Machine Tools & Manufacture*, 45:549-559, 2005 [D]
- [LAR 03] LARUE A. et ANSELMETTI B., "Deviation of a machined surface in flank milling", *Machine Tools & Manufacture*, 43:129-138, 2003 [D]
- [LAR 03b] LARTIGUE C., DUC E. et AFFOUARD A., "Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface", *Computer-Aided Design*, 35:375-382, 2003 [D]
- [LI 05] LI C., MANN S. et BEDI S., "Error measurements for flank milling", *Computer-Aided Design*, 37:1459-1468, 2005 [D]
- [MEN 04] MENZEL C., BEDI S. et MANN S., "Triple tangent flank milling of ruled surfaces", *Computer-Aided Design*, 36: 289-296, 2004 [D]
- [MOG 94] MOGNOL P., "Contribution à la génération automatique de gammes en tournage : génération dirigée par évaluation progressive", *Thèse de doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Paris, France, 1994 [A]
- [MUT 88] MUTTEL B., "Computer-Aided Group Technology Integrated System", *Annals of the CIRP* 37-1, 1988 [A]

- [NEI 65] NEIBEL B. W., "Mechanized process selection for planning new designs", *ASME paper*, vol.737, 1965 [A]
- [OZT 01] ÖZTÜRK N. et ÖZTÜRK F., "Neural network based non-standard feature recognition to integrate CAD and CAM", *Computers in Industry*, 45:123-135, 2001 [B]
- [PAR 95] PARIS H., "Contribution a la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces", *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, France, 1992 [B]
- [PER 90] PERNG D.-B., CHEN Z. et LI R.-K., "Automatic 3D machining feature extraction from 3D CSG solid input", *Computer-Aided Design*, 22-5:285-295, 1990 [B]
- [PET 99] PETERNELL M., POTTMANN H. et RAVANI B., "On the computational geometry of ruled surfaces", *Computer-Aided Design*, 31:17-32, 1999 [D]
- [POT 05] POTTMANN H. et WALLNER J., "Approximation algorithms for developable surfaces", *Computer-Aided Design*, 37:1459-1468, 2005 [D]
- [REM 04] REMY. S., "Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique », *Thèse de doctorat*, Université de Nancy I, 2004 [E]
- [RIS 97] RISACHER P., HASCOET J.Y. et BENNIS F., "Workpiece setup and machine-tool choice in milling", *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Lyon, France, 1997 [E]
- [SAB 95] SABOURIN L., "L'expertise en conception de gammes d'usinage : approches par entités et propagation de contraintes", *Thèse de doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Paris, France, 1995 [A]
- [SAD 02] SADAIAH M., YADAV D. R., MOHANRAM P. V. et RADHAKRISHNAN P., "A Generative Computer-Aided Process Planning System for Prismatic Components", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 20:709-719, 2002 [A-B]
- [SEN 05] SENATORE J., MONIES F., REDONNET J.M. et RUBIO W., "Analysis of improved positioning in five-axis ruled surface milling using envelope surface", *Computer-Aided Design*, 37:989-998, 2005 [D]
- [SHA 88] SHAH J.J., SREEVALSAN P., ROGERS M., BILLO R., et MATHEW A., "Current status of features technology", report for task 0, *Technical Report R-88-GM-01*, CAM-I, Inc., Arlington, Texas, USA, 1988 [B]
- [SHA 91] SHAH J.J., "Conceptual Development of Form Features and Feature Modelers", *Research in Engineering Design*, 2:93-108, 1991 [B]
- [SHA 95] SHAH J.J. et MÄNTYLÄ M., *Parametric and Feature-Based CAD/CAM*, John Wiley and Song, INC., 1995 [B]

- [SHA 01] SHAH J.J., ANDERSON D., KIM Y.S. et JOSHI S., "A Discourse on geometric feature recognition from CAD models", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1-1:41-51, 2001 [B]
- [SPY 90] SPYRIDIS A. J., REQUICHA A.A.G., "Accessibility for the automatic inspection of mechanical parts by coordinate measuring machines", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation* 1284-1289, Cincinnati, USA, 1990 [E]
- [SUH 95] SUH S.-H. et KANG J.-K., "Process planning for multi-axis NC machining of free surfaces", *International Journal of Production Research*, 33-10:2723-2738, 1995 [E]
- [SRI 04] SRIDHARAN et SHAH [B]
- [TIW 01] TIWARI M. K., RAMA KOTIAH K. et BHATNAGAR S., "A Case-Based Computer-Aided Process-Planning System for Machining Prismatic Components", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17:400-411, 2001 [A]
- [TOL 98] TOLLENAERE M. (sous la direction de), *Conception de produits mécaniques*, Normes et échanges de données, Hermès, 1998 [B]
- [TON 01] TÖNSHOFF H.K., GEY C. et RACKOW N., "Flank Milling Optimization – The Flamingo Project", *Air & Space Europe*, 3-3/4:60-64, 2001 [D]
- [TSA 87] TSANG J. P., "Planification par combinaison de plan. Application à la génération automatique de gammes d'usinage", *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique, Grenoble, France, 1987 [A]
- [USI w] <http://www.usiquick.com>, site web du projet USIQUICK
- [VAN 94] VANDERBRANDE J. et REQUICHA, "Geometric computation for the recognition of spatially interacting machining features", *chapitre n°5 de l'ouvrage: "Advances in Feature Based Manufacturing"*, Editions Elsevier Science, 1994 [B]
- [VIL 03] VILLENEUVE F., "Génération automatique des processus de fabrication", *Chapitre de l'ouvrage : Fabrication assistée par ordinateur*, sous la direction de : BERNARD A., Editions Lavoisier, p.295-346, ISSN/ISBN : 2-7462-0618-8, 2002 [A]
- [WU 96] WU M.C. et LIU C.R. "Analysis on machined feature recognition techniques based on B-Rep", *Computer Aided Design*, 28-8:603-616, 1996 [B]
- [WYS 77] WYSK R. A., "An automated process planning and selection program: APPAS", *Thèse de doctorat*, Université de Purdue, West Lafayette, USA, 1977 [A]
- [ZHO 03] ZHOU X. et GAINES D., "ARM: A tool for identifying and repairing un-machinable shapes in designs", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 19:343-353, Pergamon, Elsevier, 2003 [C]
- [ZIR 06] ZIRMI O., "Analyse de fabricabilité en conception de gammes d'usinage pour l'aéronautique", *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Grenoble, France, 2005 [A-B-C]

Annexes

Annexe A - Le projet USIQUICK

Genèse du projet

Depuis la création de l'APT et des autres langages de programmation de Commande Numérique (CN) qui associaient la définition géométrique des pièces à une description des usinages, l'évolution des techniques informatiques a permis de différencier la partie définition géométrique des données (dévolue au Bureau d'études) des activités de programmation des Commandes Numériques.

Les techniques ont évolué à partir de définitions 2D puis 2D1/2 et 3D Filaire jusqu'à supporter aujourd'hui la programmation de pièces définies en Solide Exact.

Les différents outils successifs, s'ils ont permis globalement d'accroître l'efficacité des programmeurs, ont surtout permis de maîtriser un niveau de complexité de pièces impensable avec les outils de la génération précédente.

En réponse à la nécessité de plus en plus pressante de diminuer les frais fixes et notamment ceux de programmation CN, des initiatives pour automatiser la création des parcours et des gammes CN ont vu le jour. Les résultats "mitigés" de ces travaux basés sur des mécanismes experts ont montré que pour satisfaire l'ambition de gagner un ordre de grandeur conséquent sur les temps de préparation/programmation, il est nécessaire d'explorer de nouvelles voies en remettant "à plat" le processus complet.

Le projet USIQUICK se place dans ce cadre innovant : Il s'agit fondamentalement de transformer les objets de Conception CAO en nouveaux objets supportant une sémantique Fabrication.

USIQUICK RNTL précompétitif

1. Maîtrise d'ouvrage, Coordination, Propriétaire du concept, Spécifications générales, Test du Logiciel, Utilisateur :
 - **DASSAULT AVIATION**
2. Cinq laboratoires Universitaires ou CNRS membres du groupe de recherche GAMA (Gamme automatique) :
 - **CRAN** : Centre de Recherche en Automatique de Nancy (UMR CNRS 7039)
 - **LURPA** : Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
 - **L3S** : Laboratoire Sol, Solides, Structures (UMR CNRS 5521)
 - **IRRCyN** : Institut de Recherches en Communication et Cybernétique de Nantes (UMR CNRS 6597)

- **LGIPM** : Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique

3. Un maître d'œuvre, responsable du développement, de la méthodologie, de la documentation, de la commercialisation et de la maintenance :
 - **DASSAULT SYSTÈMES** : En tant que maître d'œuvre, Dassault Systèmes assurera la coordination opérationnelle et le suivi technique des différentes équipes.
4. Le partenariat est complété par la participation de :
 - **CETIM** (Centre Technique des Industries Mécaniques) qui apportera son aide sur trois plans : Expertise dans les domaines du fraisage, test du produit final et promotion du produit au sein des 6 700 PME adhérentes du CETIM

Résumé

Le projet dans sa phase initiale sous montage RNTL pré-compétitif labellisé en 2003 a pour objectif l'étude préliminaire d'un logiciel d'Industrialisation de toute pièce réalisée principalement par fraisage. Le logiciel est essentiellement orienté vers les pièces de complexité moyenne ou forte.

Par Industrialisation, il faut entendre :

- Création quasi automatique de la gamme,
- Génération assistée des outillages de positionnement et bridage de la pièce,
- Génération automatique du parcours d'outils et simulation,
- Génération automatique de la documentation.



Pré Requis 1 :

La pièce finie et l'ébauche initiale dont elle est issue doivent être entièrement définies dans un modèle CAO.

Pré Requis 2 :

L'industrialisateur devra avoir introduit en base de données :

- la description de ses moyens industriels,
- le catalogue de ses outils coupants avec leurs conditions d'utilisation.

Pré Requis 3 :

Le logiciel aura de base les règles générales et standards de la mécanique mais sera ouvert au client afin qu'il puisse implémenter toutes les règles de métier relevant d'une spécialité ou de son savoir-faire particulier ceci afin de préserver le savoir-faire de chacun ainsi que l'esprit de compétitivité et de concurrence.

Architecture logicielle

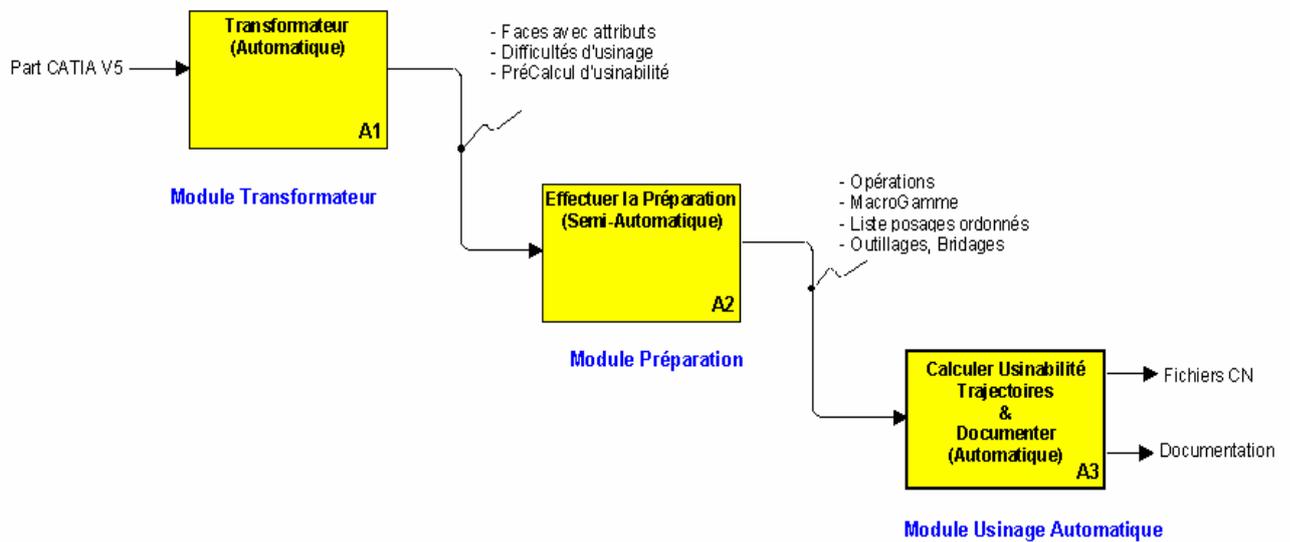


Figure 1 : Composition d'USIQUICK en modules logiciels

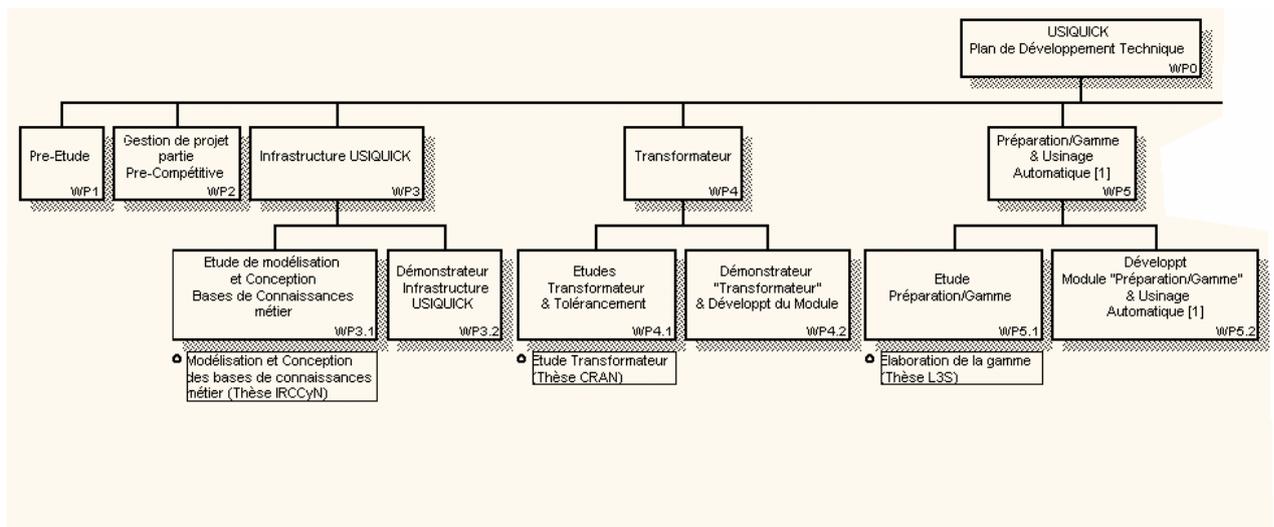
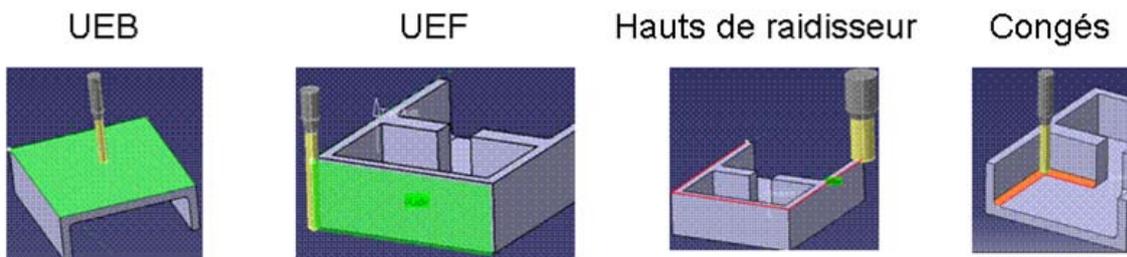


Figure 2 : Composition d'USIQUICK en WorkPackages

Workpackage 4 : Préparation/Transformateur (CRAN)

Le rôle du transformateur est d'enrichir le modèle CAO afin de lui adjoindre les informations nécessaires aux étapes de Préparation/Gamme et de Calcul de trajet outil.



Le modèle initial est purement géométrique. Il est cependant complet, c'est à dire que la géométrie est décrite complètement et de manière cohérente. Il est constitué d'un ensemble de faces adjacentes entre elles, délimitant une partie de l'espace 3D.

Dans une première approche, usiner la pièce représentée par ce modèle revient à « balayer » toute la surface de la pièce au plus prêt, de la manière la plus « judicieuse » possible avec un ensemble de géométries outils qu'on peut assimiler à des cylindres à bout torique. Lors du balayage, ces géométries outils ne doivent pas interférer avec la géométrie pièce (collision) et leurs orientations doivent être contenues dans des limites « admissibles ». Par au plus prêt on entend que le volume « matière » restant entre modèle de départ et modèle balayé doit être le plus faible possible. Par manière la plus judicieuse on entend que les géométries outils doivent être choisies de telle sorte qu'elles permettent de « retirer » le maximum de matière en un passage (plus le temps d'usinage est court, moins ça coûte). Par limites admissibles il faut comprendre que les directions des cylindres outils permettant de balayer la pièce doivent pouvoir être regroupées en quelques ensembles de directions (1, 2 ou 3 maximum) afin que l'usinage de la pièce ne nécessite pas de trop nombreux posages.

Dans ce contexte, le rôle du transformateur est de fournir un ensemble d'informations relatives aux directions de balayage possibles et avec quelles géométries outils. Le modèle initial étant constitué de faces, ces informations vont être attachées aux faces elles-mêmes, à des sous faces et à des regroupements de faces.

Dans une deuxième approche, plus « métier », la géométrie doit être considérée plus finement. En effet si cette dernière représente des entités minces par exemple (haut d'aile, fond mince), la manière de les traiter doit respecter des règles particulières. Il en est de même pour certaines faces de transition comme les congés (ou fillets) et les « coins 5 axes ». Le transformateur va devoir déterminer ces particularités et leur associer les informations permettant aux autres modules de les prendre en compte.

De ces 2 approches il ressort que les informations à générer dépendent :

1. du type de la face : plane, réglée, cylindrique, gauche ...
2. de son accessibilité, donc de son voisinage 3D,

3. de ses faces voisines (va t-on pouvoir les traiter simultanément ?),
4. des particularités de la face (fillet, haut d'aile, fond mince ...)

Le type de face a une grande importance car son usinage en dépend. Pour des raisons d'état de surface et de rapidité, une face plane s'usine préférentiellement en bout (UEB), puis en flanc (UEF). Dans ces 2 cas on peut atteindre économiquement un bon état de surface. Si pour des raisons d'accessibilité la face plane n'est ni UEB, ni UEF, elle va être usinée par balayage avec un outil torique. Si une face est cylindrique, conique, réglée développable ou quasi développable, c'est à dire si en toute règle de la surface on peut faire tangenter un cylindre, on cherchera d'abord à l'usiner en flanc (UEF).

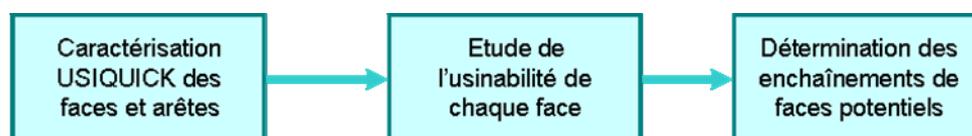
Du voisinage 3D dépend l'accessibilité à la face. Par exemple, selon sa normale, une face plane peut être cachée partiellement ou totalement par une autre face. En conséquence elle ne pourra pas être usinée totalement en bout. Cet aspect nous a conduit à introduire la notion de masque de type 1 pour les usinages UEB et masque de type 2 pour les usinages UEF. Les directions d'usinage d'une face quelconque pourront être limitées par les obstacles situés dans son voisinage.

L'usinage d'une face cylindrique et de sa face plane adjacente pourra s'enchaîner sans retrait de la fraise. Déterminer les enchaînements possibles est important pour les 2 autres modules. Une face située au fond d'une poche, c'est à dire entourée par d'autres faces selon un angle aigu sera plus difficilement accessible qu'une face sommet d'une protusion.

Un fillet n'étant pas une face fonctionnelle, mais une face de raccordement, il sera usiné de préférence lors de l'usinage de ses faces adjacentes quitte à ce que son rayon ne soit pas forcément respecté. Il est cependant important de déterminer les zones correspondantes afin que l'opérateur puisse demander si nécessaire leur reprise avec un outil à bout sphérique. Cet aspect nous a amené à introduire la notion d'epsi-masque.

Un haut d'aile devra être usiné en pleine matière avant les faces qui le borde afin qu'il ne subisse pas de déformation du à sa faible épaisseur, ses faces latérales seront ensuite usinées alternativement et progressivement.

Le Transformateur comporte 3 grandes tâches :



La caractérisation USIQUICK des faces et arêtes (tâche 1) consiste à associer à chacune de ces 2 entités les informations nécessaires au calcul de l'usinabilité qui sont pour la face : son type (plane, cylindrique, réglée, torique, fillet...), sa convexité/concavité, son rayon de courbure mini, son aire, son périmètre, sa boîte englobante... et pour l'arête : son type (droite, circulaire, quelconque), sa qualification vis à vis de ses faces adjacentes (O, F, TO, TF), l'indicateur de franchissement, le rayon de courbure mini et maxi, l'angle des tangentes normales à l'arête... Les faces participant potentiellement à des fonds minces ou des hauts d'aile sont également déterminées.

L'étude de l'usinabilité (tâche 2) de chaque face va renseigner la gamme sur une ou plusieurs manières possibles d'usiner la face et sur les géométries outils possibles. Pour chaque face on va

déterminer un ensemble d'informations dont 2 sont essentielles : le type d'usinage (UEB, UEF,...) et les directions d'usinage nécessaires. Par étude de ces directions les parties de faces masquées (non accessibles) vont être déterminées et un nouveau calcul de l'usinabilité va être effectué sur ces faces. Par étude des arêtes et des directions d'usinage associées les epsi-masques vont être calculés et associés afin de caractériser l'usinabilité du voisinage de l'arête (totale, partielle...).

La dernière tâche (tâche 3) consiste à transformer le graphe des faces CATIA en un graphe regroupant les faces enchaînables, c'est à dire pouvant être usinées les unes derrière les autres sans retrait de l'outil. Cette caractérisation s'effectue par analyse des types de faces et des enchaînements de fillets.

Annexe B – Caractéristique de l'étude dans le domaine aéronautique

L'industrie aéronautique a toujours été pionnière en termes de recherche et d'innovation. Cette avance se justifie par les exigences particulières de l'aéronautique et le besoin permanent d'améliorer les performances techniques et la sûreté des avions. Un avion se compose de plusieurs milliers de pièces : câbles électriques, circuits électroniques, tuyauteries, garnitures, composants de confort, pièces de structure (fuselage, ailes), pièces d'habillage (tôle ou matériaux composites), pièces mécaniques (moteurs, pompes et groupes de commande), pièces d'assemblage et de fixation. Dans notre cas, les pièces qui nous intéressent sont les pièces mécaniques de structure (soit environ 1000 pièces pour l'avion Falcon 7X). Leurs fonctions principales sont la connexion et le support des panneaux, la transmission des efforts et le support des charges mécaniques qui s'exercent sur la structure de l'avion.

Typologies des pièces de structure.

Pour garantir un allègement maximal, ces pièces sont constituées de parois minces (âmes, semelles, voiles et raidisseurs) qui définissent des alvéoles de formes variées (figure 1). Ces parois sont majoritairement définies par des surfaces planes non fonctionnelles, sauf sur les contours de la pièce où l'on retrouve des surfaces fonctionnelles réglées ou gauches imposées par l'esthétique et/ou les contraintes aérodynamiques de l'avion. Leurs dimensions varient entre des longueurs faibles et des longueurs maximales données par la capacité maximale supportée par les machines-outils de l'atelier étudié (1000*500*150 mm à l'usine d'Argenteuil de Dassault Aviation).

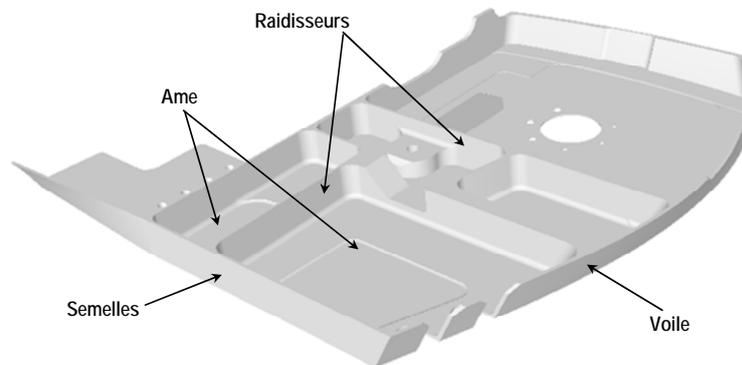


Figure 1. Type de pièce mécanique aéronautique avec ses particularités.

En général, ces pièces sont réalisées en alliage d'aluminium, mais peuvent être réalisées dans des aciers fortement alliés ou du titane pour des applications spéciales. Les spécifications géométrique et dimensionnelle de ces pièces de structure sont peu développées et peu contraignantes, la qualité dimensionnelle moyenne étant de l'ordre de +/- 0,1 mm. Ces pièces sont réalisées en très petits lots de l'ordre d'une vingtaine de pièces par an, mais peuvent être fabriquées pendant plus de 50 ans pour certains avions militaires (en moyenne un avion sort tous les trois jours). Une étude industrielle a été menée dans l'atelier de fabrication et permet de distinguer 6 catégories de pièces à fabriquer. 90% de la production est constituée de pièces « simple face » et « double face ». Cette

classification correspond aux pièces réalisées avec deux posages. Dans le cas des pièces « simple face », seulement un surfaçage et des alésages de mise et de maintien en position sont réalisés sur l'un des deux posages.

Stratégies de fabrication

Nous proposons dans ce qui suit de caractériser les méthodes et les stratégies de fabrication inhérentes au domaine de l'usinage pour l'aéronautique. La pièce « façonnée » dans un large bloc d'aluminium est positionné sur la table d'usinage par un appui plan prépondérant et maintenue rattachée au brut durant l'ensemble des phases d'usinage par l'intermédiaire de pattes de maintien. Pour accéder aux surfaces non accessibles, il suffit généralement pour la deuxième phase de retourner le bloc en s'appuyant sur le plan opposé. Plusieurs machines ou outils seront utilisés lors de la fabrication : les machines fraiseuses ou centres CN 3-4-5 (récemment 2 centres UGV ont été ajoutés aux machines de l'atelier), des outils standards utilisés en fraisage CN (la quasi-totalité des fraises sont de 2 tailles rayonnées, des montages d'usinage standards (bridages sur table et crampons plaqueurs) pour le premier posage et spécifiques sur les posages suivants (des blocs d'aluminium fraisés pour accueillir des éléments de mise en position à la création de la zone d'aspiration sous vide). La stratégie globale d'usinage est constituée d'une ébauche totale de l'ensemble de la pièce, suivie d'une succession d'opérations de finition. Concernant les modes d'usinage, 98% des faces des pièces seront réalisées suivant deux modes d'usinage : l'usinage en bout et l'usinage en flanc. L'usinage en bout est un usinage où l'outil est placé perpendiculairement à la face. L'usinage en flanc est caractérisé par l'usinage par roulement d'une fraise cylindrique ou torique sur des surfaces réglées. Pour les faces non réalisables en bout ou en flanc, on utilisera l'usinage 3 tailles, le balayage, l'usinage par fraise de forme ou les usinages axiaux.

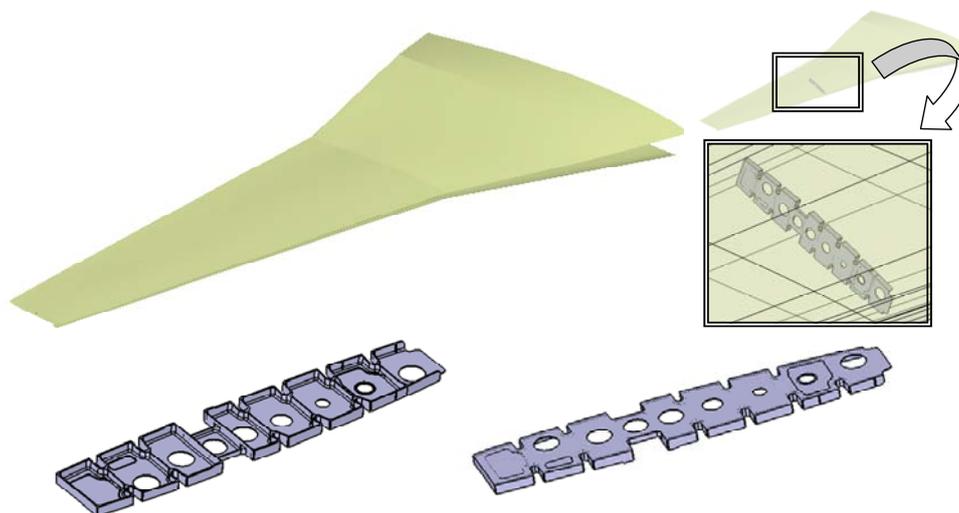


Figure 2. Pièce « Nervure de Voilure » pile et face, ainsi que son positionnement sur l'aile d'un avion

Conception de gammes

Différents acteurs collaborent pour réaliser les programmes d'usinage d'une pièce : le

programmeur qui définit la gamme d'usinage (posages, opérations nécessaires, outils) et le programme (calcul des trajectoires et génération du fichier CN), le programmeur des outillages qui conçoit le montage d'usinage, le préparateur qui réalise la gamme de fabrication de la pièce (niveau macro) et l'acteur en charge de la simulation qui simule et valide le programme CN pour son utilisation dans l'atelier. Les activités du programmeur sont les activités les plus longues et fastidieuses, dont le coût est important. En moyenne, la durée de programmation d'une pièce de forte complexité est de l'ordre de 6 semaines (soit 210 heures).

Annexe C – Temps de traitement des pièces mécaniques (en secondes)

	Pièce CATIA V5
	Pièce CATIA V4
	Pièce importée d'un fichier STEP
	Activation de sortie vers VB (génération des fichiers textes)
	Fonctionne sans problème
	Fonctionne avec des problèmes mineurs
	Ne fonctionne pas
	Temps total
	Non activé
X	Echec particulier du module

TOUT = temps d'analyse totale

CARAC. = Phase de caractérisation géométrique

TYP. = Typage d'usinage

DU = Directions d'usinage

MT1 = Usinage en Bout

MT2 = Usinage en Flanc

ENCHAINEMENT = Génération du graphe d'enchaînement

E. MINCES = Identification des entités minces

Le 6 Avril 2006

Pièce	TOUT	CARAC.	TYP.	DU	MT1	MT2
<i>C01</i>	53				39	
<i>C02</i>	85				69	
<i>C03</i>	40				34	
<i>C04</i>	5				2	
<i>C05</i>	12				10	
<i>C06</i>	5				3	
<i>C07</i>	7				5	
<i>C08</i>	1				0	
<i>D01</i>	66				52	
<i>D02</i>	135				97	
<i>D03</i>	345				280	
<i>D04</i>	250				232	
<i>D05</i>	Cara	X				
<i>D06</i>	Cara	X				
<i>D07</i>	135				112	
<i>D08</i>	75				60	
<i>D09</i>	Cara	X				
<i>D10</i>	90				58	

Le 20 Octobre 2006

Pièce	TOUT	CARAC.	TYP.	DU	MT1	MT2
C01	40	2	1			
C02	55	2	1			
C03		2	1		7	
C04	4	1	1			
C05	3	1	1			
C06	3	1	1			
C07	3	1	1			
C08	1	1	1			
D01	22	2	1			
D02	43	3	1			
D03		18	1		78	
D04	46	3	1			
D05	170	7	1			
D06		3	1		8	
D07	43	3	1			
D08	56	3	1			
D09	76	3	1			
D10	75	3	1			
DC1		2	1		3	
DC2		3	1		8	
DC3 - D08	42	2	1			

Le 5 Novembre 2006

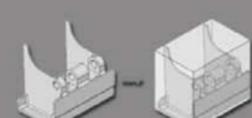
Pièce	TOUT	CARAC.	TYP.	DU	MT1	MT2	ENCHAINEMENT	E. MINCES
C01	14						1	1
C02	27						1	1
C03	22						1	1
C04	3						1	1
C05	3						1	1
C06	2						1	1
C07	2						1	1
C08	1						1	1
D01	23						1	1
D02	36						1	1
D03	191						1	1
D04	80						1	1
D05	540						1	1
D06	16						1	1
D07	55						1	1
D08	22						1	1
D09	58						1	1
D10	42						1	1
DC1	3						1	1
DC2	35						1	1
DC3 - D08	19						1	1

Le 26 Novembre 2006

		1	2	3	4	5	6	7
Pièce	TOUT	CARAC.	TYP. DU	MT1	MT2	1er Posage	ENCHAINEMENT	E. MINCES
C01	15						1	1
C02	28						1	1
C03	23						1	1
C04	3						1	1
C05	3						1	1
C06	2						1	1
C07	2						1	1
C08	2						1	1
D01	25						1	1
D02	38						1	1
D03	195						1	1
D04	81						1	1
D05	551						1	1
D06	19						1	1
D07	57						1	1
D08	24						1	1
D09	60						1	1
D10	44						1	1
DC1	5						1	1
DC2	38						1	1
DC3 - D08	20						1	1

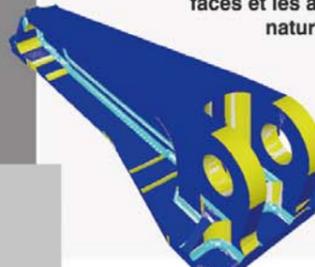
Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage

dimensions et brut



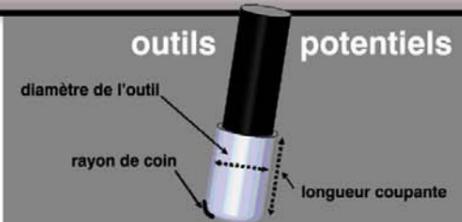
Cette fonction détermine l'encombrement de la pièce et propose un premier brut

reconnaissance géométrique



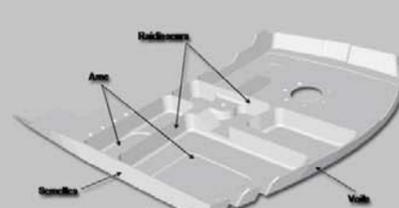
Cette fonction type les différentes faces et les arêtes suivant leurs natures respectives

outils potentiels



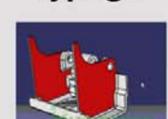
Cette fonction fournit les dimensions potentielles à partir de la BD des outils disponibles

entités caractéristiques



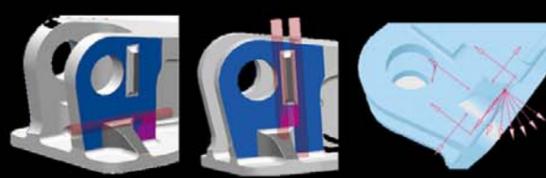
Cette fonction calcule l'ensemble des zones critiques nécessitant un traitement spécifique, par exemple: les hauts d'ailes et les fonds minces

typage



A partir de règles métiers, ce module détermine les modes d'usinage des faces

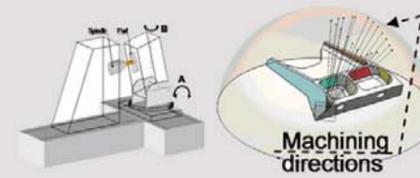
directions d'usinage



Cette fonction calcule les directions d'usinage potentielles relatives à une face

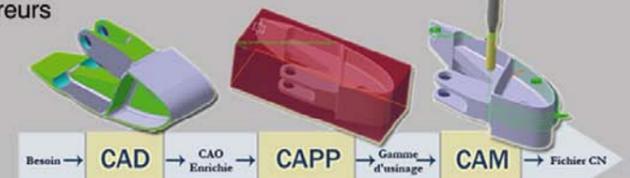
Quelles fonctions pour un logiciel CAPP ?

accessibilité machine



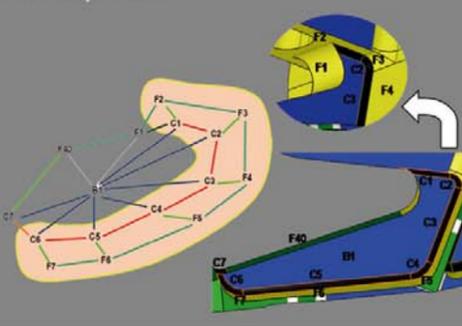
Pour une orientation de la sphère d'accessibilité machine, cette fonction scinde en deux groupes les directions d'usinage

Cette activité (Computer Aided Process Planning) se situe à l'interface de la CAO (CAD) et de la FAO (CAM). Actuellement, elle nécessite l'analyse de la pièce par l'opérateur, opération souvent très complexe qui prend beaucoup de temps. La non prise en compte de particularités difficilement visibles aboutit à la réalisation de pièces non conformes qui doivent être reprises. La mise en évidence par logiciel de ces particularités doit diminuer considérablement les erreurs de programmation et par conséquent réduire le temps nécessaire à leur traitement.

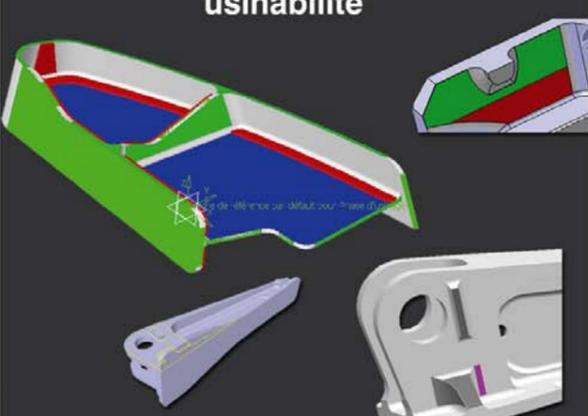


enchaînement

Établit la liste des faces usinables dans une même opération.

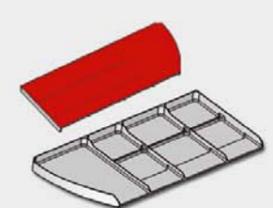


usinabilité



Cette fonction visualise pour chaque face la zone usinable en bout ou en flanc par une fraise de rayon nul. Elle évalue l'usinabilité d'une face

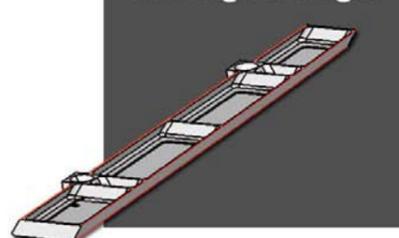
posage



Proposition des posages permettant l'usinage optimal de la pièce.



cassage d'angle



Ramy F. HARIK

NumCOP2
SYMPA, CRAN
Université Henri Poincaré
Nancy, France

Directeur de Thèse
Prof. Gabriel RIS

http:// www.ramy.eu
e-mail: ramy.harik@cran.uhp-nancy.fr

Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK

Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK

Notre travail de thèse se place dans le cadre du projet RNTL USIQUICK (www.usiquick.com) dont l'objet est de répondre aux besoins des industries aéronautiques dans le domaine de la fabrication de pièces de structure de complexité moyenne à forte. Il s'agit d'assurer l'automatisation de l'élaboration des posages, de la gamme et des programmes d'usinage. Notre contribution se trouve dans l'étude du Transformateur qui est le module d'enrichissement de la géométrie pièce en une géométrie adaptée à la fabrication. Ce Transformateur doit fournir les informations nécessaires aux 2 modules avalés d'USIQUICK : le module Préparation et le module Calcul de Trajectoire.

L'enchaînement des étapes permettant le calcul de ces fonctions est déterminé. Il comporte :

- une première étape d'enrichissement du modèle géométrique CAO,
- une deuxième étape permettant d'extraire les entités d'usinage élémentaires. Aux faces sont ainsi liées les informations technologiques suivantes : mode d'usinage, directions et outils possibles,
- une troisième étape d'analyse du graphe d'adjacence de la pièce qui détermine les faces pouvant être usinées simultanément.

Ces étapes sont implémentées en CAA® dans un démonstrateur dont la validité est présentée sur quelques exemples. Son degré de robustesse est évalué.

Les apports de ce travail sont relatifs à la notion d'entité élémentaire, d'entité de haut niveau orientée type d'usinage, de caractérisation des extrémités d'élancements et à la définition de fonctions opérateur.

Le mémoire se termine par une synthèse des fonctions qui devraient être implémentées dans le logiciel CATIA afin que le Transformateur devienne un produit industriel.

Mots-Clés

Gamme d'usinage, Entité d'usinage, Fabrication automatique, Usinage en Flanc, CAPP, Aéronautique

Specified functions for an automated process planning generation system: Application on aircraft structural parts, software prototype within the RNTL Usiquick project

Our PhD work comes within the framework of the USIQUICK RNTL project (www.usiquick.com) that aims to answer the needs of some aircraft industries in the domain of structural parts manufacturing that are of an average to high complexity. Automating the manufacturing fixture, process planning and generating the NC programs are the expected results. Our contribution lies in the study of the 'Transformer', a module dedicated to enriching the part geometry into one that is adapted to manufacturing. The 'Transformer' must supply the necessary information needed by the two other USIQUICK modules: Process planning and Automatic milling path generator.

The sequence of steps allowing to compute the different functions is determined. It includes:

- a first step during which the CAD geometrical model is enriched,
- a second step during which the different 'Elementary Manufacturing Features' are extracted. The faces composing the CAD model are completed by their: milling mode, milling directions and possible milling tools,
- a last step, where a face adjacency' graph analysis is proceeded, pointing all the faces that could be milled simultaneously.

These steps are implemented using CAA® in a prototype. The validity is presented in some examples. The degree of its robustness is evaluated.

The main results of our PhD are: the definition of the 'Elementary Manufacturing Feature', high level milling features extractions, thin features identification and the CAPP functions definition.

This PhD report ends with a synthesis of the functions that should be implemented in CATIA so that the 'Transformer' becomes an industrial product.

Keywords

Process Planning, Machinning Features, Automated Production, Aeronautics, CAPP, Flank Milling